

**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.

ISSN 1998-426X



Индекс для подписки в агентстве  
«Роспечать» – 57988

© «Радиационная гигиена», 2019

# РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

## RADIATIONNAYA GYGIENA

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

Главный редактор  
**И.К. Романович**



Том 12 № 1, 2019

## 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, член-корреспондент РАН (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

## Заместитель главного редактора

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

## Редакционный совет

**Александрин Сергей Сергеевич** — ФГБУ «Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины им. А.М. Никифорова» МЧС России, д.м.н. профессор (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)

**Заредина 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)

**Надарешвили 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)

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

**Рыбников Виктор Юрьевич** — ФГБУ «Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины им. А.М. Никифорова» МЧС России, д.м.н., д-р психол. наук, профессор (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)

**Щандала 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. 12 № 1, 2019

# RADIATION HYGIENE

---

Vol. 12 № 1, 2019

## 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, M.D., Professor, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences (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 (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 (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», Member of the Russian Sciences Academy, 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, Member 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)

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

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

**Valeriy P. Ramzaev** – Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Candidate of 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)

**Victor Yu. Rybnikov** – Federal State Organization «A.M. Nikiforov All-Russia Center of Emergency and Radiation Medicine» EMERCOM of Russia), M.D., Doctor of Psychology, Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation (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 12 № 1, 2019

### ОБЗОРЫ

Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К., Водоватов А.В., Башкетова Н.С., Историк О.А., Чипига Л.А., Шацкий И.Г., Релин Л.В., Библин А.М.

**Современные принципы обеспечения радиационной безопасности при использовании источников ионизирующего излучения в медицине. Часть 1. Тенденции развития, структура лучевой диагностики и дозы медицинского облучения ..... 6**

### НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

Панов А.В., Прудников П.В., Титов И.Е., Кречетников В.В., Ратников А.Н., Шубина О.А.

**Радиоэкологическая оценка сельскохозяйственных земель и продукции юго-западных районов Брянской области, загрязненных радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС ..... 25**

Рамзаев В.П., Барковский А.Н.

**Estimation of the air kerma rate from  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{134}\text{Cs}$  deposited on the ground in the Sakhalin region of Russia after the Fukushima accident..... 36**

Крестинина Л.Ю., Силкин С.С., Дегтева М.О., Аклейев А.В.

**Риск смерти от болезней системы кровообращения в Уральской когорте аварийно-облученного населения за 1950–2015 годы..... 52**

Водоватов А.В.

**Использование тест-объекта «контраст-деталь» для оценки возможности снижения доз облучения пациентов в цифровой рентгенографии органов грудной клетки ..... 62**

Библин А.М.

**Модель риск-коммуникации с населением по вопросам радиационной безопасности и проведение на её основе научных исследований ..... 74**

Конonenko Д.В.

**Анализ распределений значений объемной активности радона в воздухе помещений в субъектах Российской Федерации ..... 85**

Чипига Л.А.

**Исследование программ автоматической модуляции силы тока для оптимизации протоколов сканирования в компьютерной томографии ..... 104**

### САНИТАРНО-ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИЙ НАДЗОР

Назаров Х.М., Эрматов К.А., Бахронов С.М., Мухамедова С.Г., Мирсаидов У.М.

**Оценка потенциальной радиационной опасности хвостохранилища Дигмай (Таджикистан) для населения, проживающего вокруг него..... 115**

### ДИСКУССИИ

Губин А.Т., Сакович В.А.

**Предложения по включению в НРБ-2019 раздела по радиогенному риску..... 122**

**ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА «РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА» ..... 129**

## CONTENTS

Vol. 12 № 1, 2019

### REVIEWS

Onischenko G.G., Popova A.Yu., Romanovich I.K., Vodovatov A.V., Bashketova N.S., Istorik O.A., Chipiga L.A., Shatsky I.G., Repin L.V., Biblin A.M.

**Modern principles of the radiation protection from sources of ionizing radiation in medicine. Part 1: Trends, structure of X-ray diagnostics and doses from medical exposure ..... 21**

### RESEARCH ARTICLES

Panov A.V., Prudnikov P.V., Titov I.E., Krechetnikov V.V., Ratnikov A.N., Shubina O.A.

**Radioecological assessment of the agricultural lands and products in south-west districts of the Bryansk region contaminated by radionuclides as the result of the Chernobyl NPP accident ..... 34**

Рамзаев В.П., Барковский А.Н.

**Оценка мощности воздушной кермы гамма-излучения  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{134}\text{Cs}$ , выпавших на почву в Сахалинской области России после Фукусимской аварии ..... 36**

Krestinina L.Yu., Silkin S.S., Degteva M.O., Akleyev A.V.

**Risk analysis of the mortality from the diseases of the circulatory system in the Ural cohort of emergency-irradiated population for the years 1950–2015 ..... 60**

Vodovatov A. V.

**Evaluation of the dose reduction capabilities in digital radiography of the chest using contrast-detail phantom ..... 72**

Biblin A.M.

**Development of the model of radiation risk-communication with the public for the arrangement of the research..... 82**

Kononenko D.V.

**Analysis of distributions of indoor radon concentrations in the regions of the Russian Federation ..... 101**

Chipiga L.A.

**Evaluation of tube current modulation programmes for the optimization of scan protocols in computed tomography ..... 113**

### SANITARY AND EPIDEMIOLOGICAL SURVEILLANCE

Nazarov Kh.M., Ermatov K.A., Bakhronov S.M., Mukhamedova S.G., Mirsaidov U.M.

**Assessment of the potential radiation hazard of the Dehmoy tailings pond (Tajikistan) for the population living around it..... 120**

### DISCUSSIONS

Gubin A.T., Sakovich V.A.

**Proposals for inclusion in NRB-2019 Section on radiogenic risk ..... 126**

**JOURNAL OF RADIATION HYGIENE – INSTRUCTIONS FOR AUTHORS..... 129**

# Современные принципы обеспечения радиационной безопасности при использовании источников ионизирующего излучения в медицине.

## Часть 1. Тенденции развития, структура лучевой диагностики и дозы медицинского облучения

Онищенко Г.Г.<sup>1,6</sup>, Попова А.Ю.<sup>2,7</sup>, Романович И.К.<sup>3</sup>, Водоватов А.В.<sup>3</sup>, Башкетова Н.С.<sup>3,4</sup>, Историк О.А.<sup>5</sup>, Чипига Л.А.<sup>3</sup>, Шацкий И.Г.<sup>3</sup>, Репин Л.В.<sup>3</sup>, Библин А.М.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Российская академия наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, Россия

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В.Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup>Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по городу Санкт-Петербургу

<sup>5</sup>Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Ленинградской области

<sup>6</sup>Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), Москва, Россия

<sup>7</sup>Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Россия

*Внедрение современных высокоинформативных методов лучевой диагностики (компьютерной томографии, интервенционных исследований, радионуклидной диагностики), ведущее к росту дозовой нагрузки на население, обуславливает необходимость совершенствования системы радиационной защиты в медицине. Несмотря на тотальное преобладание в структуре лучевой диагностики в Российской Федерации традиционных методов исследований (из 280 млн рентгенорадиологических процедур, выполненных в 2017 г., 95% приходится на рентгенографические и флюорографические исследования), основной вклад в коллективную дозу облучения населения страны вносит компьютерная томография (50,5%). Структура лучевой диагностики и коллективной дозы от медицинского облучения в Российской Федерации существенно отличается от аналогичных показателей стран Евросоюза, в которых практически отсутствуют флюорографические исследования, а вклад компьютерной томографии в 2–5 раз выше, чем в нашей стране. В среднем коллективная доза от медицинского облучения в странах Европы на 80% формируется за счет компьютерной томографии и около 10% – за счет радионуклидной диагностики; средние эффективные дозы за рентгенорадиологическое исследование в 2–3 раза выше среднероссийских. Спрогнозирован дальнейший рост в Российской Федерации числа компьютерных томограмм, интервенционных и радионуклидных исследований и двойное повышение коллективной дозы от медицинского облучения за десятилетие как за счет изменения структуры лучевой диагностики, так и за счет роста средних доз за рентгенорадиологические исследования.*

**Ключевые слова:** лучевая диагностика, коллективная доза, медицинское облучение, дозы облучения, эффективная доза, профилактические исследования.

### Введение

Защита от источников ионизирующего излучения (ИИИ) в медицине в настоящее время является ключевой в мировой практике обеспечения радиационной безопасности населения. Свидетельством этому являются все новые и новые рекомендации ведущих международных организаций, таких как Научный комитет по действию

атомной радиации ООН (НКДАР ООН) [1], Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) [2, 3], Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) [4, 5], Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) [6, 7], а также увеличение количества научных публикаций в ведущих мировых изданиях [8–13]. Традиционно использование источников ионизирующего излучения

### Водоватов Александр Валерьевич

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

(ИИИ) в медицине является одним из основных факторов облучения населения, занимая второе место по вкладу в коллективную дозу населения после природных источников и первое место среди техногенных источников [1–7, 14]. Медицинскому облучению подвергаются: пациенты при проведении медицинских диагностических и лечебных процедур, практически здоровые лица при проведении профилактических рентгенологических (флюорографических) исследований, добровольцы – участники биомедицинских исследований, а также лица, оказывающие помощь пациентам и осуществляющие уход за ними [5, 6]. Облучению в медицине подвергается больше людей, чем в любой другой отрасли с использованием ИИИ, и во многих случаях индивидуальные дозы в медицине выше, чем при других видах применения техногенных ИИИ [1–7, 14].

Включение основных направлений обеспечения радиационной безопасности в медицине в «Основы государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу», введенных в действие Указом Президента Российской Федерации от 13.10.2018 г. № 585<sup>1</sup>, свидетельствует о значимости данной проблемы в нашей стране.

Роль оптимизации защиты населения страны при использовании ИИИ в медицине значительно возрастает в связи с принятием Указа Президента Российской Федерации от 07.05.2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года»<sup>2</sup>. В соответствии с данным Указом национальной целью и стратегической задачей является повышение ожидаемой продолжительности жизни до 78 лет (к 2030 г. – до 80+ лет). Одной из задач до 2024 г. является снижение показателей смертности населения трудоспособного возраста (до 350 случаев на 100 тыс. населения), в том числе от злокачественных новообразований (до 185 случаев на 100 тыс. населения), что предполагает раннюю диагностику и повышение качества проведения лучевой диагностики и терапии. Развитие ранней диагностики злокачественных новообразований непременно приведет к увеличению частоты рентгеновских диагностических и профилактических исследований и к применению более информативных рентгенодиагностических методов исследования (компьютерной томографии (КТ), позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ-КТ)), и следовательно, к более высоким дозам облучения пациентов и населения страны в целом [14–20]. Применение современных высокоинформатив-

ных методов лучевой диагностики, наряду с увеличением диагностической эффективности, приводит к возрастанию рисков возникновения злокачественных новообразований за счет роста доз облучения населения.

**Цель исследования** – анализ современной структуры лучевой диагностики в Российской Федерации и зарубежных странах с определением трендов развития и внедрения технологий и методов лучевой диагностики и оценкой уровней медицинского облучения, как на текущий момент, так и в перспективе.

### 1. Современные тенденции развития лучевой диагностики

Высокий уровень развития современных методов лучевой диагностики и продолжающееся их совершенствование свидетельствует о том, что на ближайшие 10–15 лет именно они будут обеспечивать получение основного объема диагностической информации [21, 22]. Развитие лучевой диагностики проходит по двум направлениям. Первое – это совершенствование «старых» методов диагностики: разработка новых алгоритмов реконструкции и детекторов в КТ [21–23] и рентгенографии без принципиального изменения сути метода; переработка существующих методов (трансформация линейной томографии в томосинтез) [24]; разработка комбинированных систем (комбинации ПЭТ и ОФЭКТ с КТ и МРТ [17–19, 21]; рентгеноперационные совмещенные с КТ и МРТ) [21, 22].

Постоянно расширяется спектр применения КТ-технологий. Так, разработан метод конусно-лучевой компьютерной томографии (cone-beam CT), который позволяет получать трехмерное изображение отдельных частей тела (голова, конечности и др.) [25]. Данный вид диагностики активно используется в зарубежных странах в стоматологии и челюстно-лицевой хирургии для контроля позиционирования пациента в лучевой терапии [26–28]. Для увеличения диагностической эффективности и повышения диагностического качества КТ-изображений используется так называемая двухтрубчатая КТ (dual-energy CT), при проведении которой пациента сканируют одновременно двумя рентгеновскими пучками с разными энергиями. Это позволяет значимо улучшить визуализацию отдельных, в частности мягкотканых, анатомических структур за счет увеличения контраста [29, 30].

КТ все чаще используется в сочетании с другими традиционными методами лучевой диагностики. Так, в радионуклидной диагностике гамма-камеры и ПЭТ-томографы комбинируют с компьютерными томографами

<sup>1</sup> Указ Президента РФ от 13.10.2018 № 585 «Об утверждении Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу»: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_308884/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_308884/) (Дата обращения: 06.02.2019). [The decree of the President of the Russian Federation №585, 13.10.2018, "On the establishment of the Basics of the governmental policy on the provision of the nuclear and radiation safety of the Russian Federation up to 2025 and in the further perspective" – Available from: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_308884/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_308884/) (Accessed 06.02.2019)]

<sup>2</sup> Указ Президента РФ от 07.05.2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года»: <http://kremlin.ru/acts/bank/43027> (Дата обращения: 06.02.2019). [The decree of the President of the Russian Federation №204, 07.05.2018 "On the national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation up to 2024". – Available from: <http://kremlin.ru/acts/bank/43027> (Accessed: 06.02.2019)].

ми (ПЭТ/КТ, ОФЭКТ/КТ), что позволяет не просто оценить накопление радиофармпрепарата в органах интереса, но и осуществить анатомическую привязку очага накопления [17–19, 21]. Современные рентгенохирургические методы все чаще включают в себя замену рентгеновского аппарата на компьютерный томограф для получения более качественного трехмерного изображения [31].

В зарубежной лучевой диагностике растет роль методов, использующихся для скрининга (раннего выявления) отдельных социально значимых заболеваний в группах риска. Помимо уже упомянутого применения КТ, для скрининга рака легких и атеросклероза активно внедряется томосинтез – метод диагностики, позволяющий получить трехмерное (объемное) изображение анатомической области интереса за счет выполнения серии рентгеновских снимков под разными углами. В настоящее время томосинтез (как отдельный вид лучевой диагностики, так и в сочетании с традиционной маммографией) внедрен в большинстве европейских стран для скрининга рака молочной железы [24, 32, 33]. Томосинтез грудной клетки (для скрининга рака легкого) широкого распространения в зарубежных странах не получил [34]. В отдельных странах (Япония) в качестве метода скрининга различных видов рака используются гибридные методы радионуклидной диагностики (ПЭТ, ПЭТ/КТ) [35]. Следует отметить, что современные методы скрининга ассоциированы с дозами облучения, превышающими 1–2 мЗв, однако в зарубежных странах они применяются исключительно добровольно и только для групп риска, для лиц, как правило, старше 40 лет. Массовый скрининг на туберкулез (флюорография) в зарубежных странах не проводится.

Усовершенствованные традиционные методы РРИ в первую очередь обеспечивают значительное улучшение диагностической эффективности (информативности) в лучевой диагностике. Что же касается уровней облучения пациентов, то в одних случаях наблюдаются тенденции к снижению доз облучения пациентов за счет повышения чувствительности приемников изображения и алгоритмов реконструкции [36, 37], в других – к увеличению за счет сочетанного облучения (внешнее+внутреннее) в случае гибридных методов исследований [18–20].

Второе направление развития лучевой диагностики – это ее трансформация в так называемую молекулярную диагностику (molecular imaging), позволяющая идентифицировать патологический процесс на уровне единичных «больных» клеток [21, 22]. На сегодняшний день эта задача реализуется посредством радионуклидных методов, таких как однофотонная эмиссионная компьютерная

томография (ОФЭКТ), позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) и функциональная МРТ (f-MRT).

Развитие отечественной лучевой диагностики заключается в продолжающейся планомерной замене аналоговых технологий на цифровые, но этот процесс протекает достаточно медленно. По данным из формы 30 Министерства здравоохранения Российской Федерации<sup>3</sup> на 2016 г., около 20% рентгеновских аппаратов в Российской Федерации являются аналоговыми, при этом 30% рентгенографических исследований выполняются на пленку. Проблема перехода на цифровые технологии наиболее полно решена только для флюорографии – более 95% флюорографов являются цифровыми.

Внедрение же современных и перспективных диагностических технологий в Российской Федерации, за исключением компьютерной томографии, протекает медленно и неравномерно. Как правило, они появляются в отдельных медицинских организациях в крупных субъектах Российской Федерации и не способны на данном этапе значимо повлиять на структуру медицинского облучения населения РФ. Большинство новых методов лучевой диагностики в Российской Федерации практически не внедряются из-за высокой стоимости современного зарубежного оборудования, при отсутствии отечественных разработок [14]. Вместе с тем, необходимо отметить постепенное внедрение в Российской Федерации (главным образом в Москве и Санкт-Петербурге) конусно-лучевой КТ в стоматологии и томосинтеза для скрининга рака молочной железы.

Отдельного внимания заслуживает развитие в Российской Федерации ядерной медицины. Ядерная медицина – направление современной медицины, использующее биологические молекулы, меченные радионуклидами (радиофармпрепараты (РФП)), для диагностики и терапии. Уникальность и высокая эффективность методов ядерной медицины основана на применении высокотехнологичного оборудования и РФП, способных накапливаться в определенных морфологических структурах и патологических очагах и отражать динамику протекающих в органе процессов, определяя патологические изменения на молекулярном уровне [38, 39].

В рамках реализации программы «Развитие ядерной медицины в Российской Федерации»<sup>4</sup> происходит реорганизация отделений радионуклидной диагностики и обновление аппаратного парка, появляются новые методы и технологии. Взамен планарным скинтиграфическим аппаратам приходят однофотонные эмиссионные компьютерные томографы (ОФЭКТ), развивается позитронная

<sup>3</sup> Приказ Росстата от 03.08.2018 № 483 (ред. от 01.10.2018) «Об утверждении статистического инструментария для организации Министерством здравоохранения Российской Федерации федерального статистического наблюдения в сфере охраны здоровья»: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_304485/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_304485/) (Дата обращения: 06.02.2019). [The Order of the Statistical Service of the Russian Federation № 483 (03.08.2018, ed. 01.10.2018) “On the establishment of the statistical tools for the governance of the federal statistical surveillance in healthcare by the Ministry of Healthcare of the Russian Federation”. – Available from: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_304485/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_304485/) (Last accessed 06.02.2019)].

<sup>4</sup> Распоряжение Правительства Российской Федерации от 23.10.2015 № 2144-р «Об утверждении плана мероприятий («дорожной карты») «Развитие центров ядерной медицины»: <https://www.rosminzdrav.ru/ministry/61/23/stranitsa-967/razvitie-tsentrov-yadernoy-meditsiny> (Дата обращения: 06.02.2019). [Instruction of the Government of the Russian Federation №2144-p (23.10.2015) “On the establishment of the action plan (road-map) “Development of the nuclear medicine centers”. - Available from: <https://www.rosminzdrav.ru/ministry/61/23/stranitsa-967/razvitie-tsentrov-yadernoy-meditsiny> (Accessed: 06.02.2019)]

эмиссионная томография (ПЭТ), появляются гибридные методы исследования: ОФЭКТ и ПЭТ, совмещенные с рентгеновской компьютерной томографией или магнитно-резонансной томографией. Появляются новые РФП для диагностических исследований и для терапевтических процедур [38, 39].

Следует также отметить растущую во всем мире роль методов лучевой диагностики, выполняющихся без использования ионизирующего излучения, – ультразвуковой диагностики (УЗИ), магнитно-резонансной томографии (МРТ). Распространение данных методов позволяет существенно сократить число выполняющихся РРИ; они являются стандартом для диагностики ряда заболеваний. К сожалению, метод УЗИ является чрезвычайно операторо-зависимым: точность определения патологии определяется квалификацией и опытом работы оператора [40]. Недостатком МРТ являются экономические факторы (высокая стоимость оборудования), время проведения исследования (несколько десятков минут в среднем) и ограничения по состоянию пациента (высокая аллергенность и нефротоксичность контрастных средств, ограничения для пациентов с имплантатами и др.) [41].

## 2. Источники данных о дозах облучения пациентов в Российской Федерации и зарубежных странах

В зарубежной практике проведение крупномасштабных сборов данных в рамках страны или группы стран на регулярной основе не практикуется. Такие мероприятия организуются периодически, с интервалом в 5–10 лет [1, 42, 43], что позволяет оценить текущие уровни облучения пациентов. Особенностью зарубежных сборов данных является оценка доз только от основных видов рентгенорадиологических исследований, вносящих максимальный вклад в коллективную дозу облучения населения (концепция Top 20). Также в рамках таких сборов данных производится оценка стандартных (typical) эффективных доз облучения пациентов. Участие в сборах данных является добровольным, в них принимают участие до 80% МО в стране. Результаты сборов данных находятся в открытом доступе [42, 43]. Недостатком зарубежных сборов данных является их низкая периодичность – актуальные данные по странам Европейского союза доступны по состоянию на 2014 г. [42].

В Российской Федерации данные по дозам пациентов от различных РРИ централизованно собирают в рамках радиационно-гигиенической паспортизации (РГП) и единой системы контроля и учета индивидуальных доз

облучения граждан (ЕСКИД)<sup>5</sup>. О ведении РГП и ЕСКИД нами подробно изложено в предыдущих публикациях [44, 45]. Данные формы заполняются на объектовом, региональном и федеральном (национальном) уровне. Дозы пациентов определяют в медицинских организациях ежегодно и передают в федеральный банк данных по форме №3-ДОЗ. В данной форме содержатся как сведения о числе выполненных РРИ по видам исследований за отчетный год, так и рассчитанные коллективные дозы пациентов за этот же период. Форма №3-ДОЗ включает сведения как об измеренных, так и о расчетных эффективных дозах. При этом измеренные дозы определяют согласно МУ 2944-11<sup>6</sup> и МУ 2.6.1.3151-13<sup>7</sup>. Значения расчетных доз соответствуют средним значениям индивидуальных эффективных доз взрослых пациентов для различных РРИ.

Следует отметить некоторые недостатки формы №3-ДОЗ [46]:

- отсутствуют сведения об уровнях облучения пациентов в лучевой терапии;
- отсутствуют сведения об аппаратном парке медицинских организаций;
- отсутствуют сведения об уровнях облучения пациентов при проведении гибридных методов диагностических исследований (ПЭТ/КТ и ОФЭКТ/КТ);
- структура формы не позволяет выделить и оценить дозы от отдельных видов РРИ, выполняющихся в одной анатомической области;
- не содержатся данные о поло-возрастном составе пациентов, подвергающихся медицинским процедурам, что затрудняет оценку риска медицинского облучения;
- низкая достоверность данных. До 40% МО заполняют форму 3-ДОЗ с использованием табличных значений доз из методических указаний по заполнению формы №3-ДОЗ.

На региональном уровне, помимо заполнения формы №3-ДОЗ, ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева периодически проводит выборочный сбор данных и оценку доз облучения пациентов от наиболее распространенных видов РРИ [15, 16]. Такие исследования обеспечивают необходимую детализацию и достоверность данных о медицинском облучении пациентов. На 2018 г. подробные работы были выполнены в 18 регионах Российской Федерации [15–20, 47].

Инструментальный метод определения доз облучения пациентов в Российской Федерации до настоящего времени реализован недостаточно. По данным собственных исследований [46, 47], менее 20% рентгеновских аппаратов оснащены клиническими дозиметрами. При этом до-

<sup>5</sup> Приказ Минздрава РФ от 31.07.2000 N 298 «Об утверждении Положения о единой государственной системе контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан»: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_98143/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_98143/) (Дата 06.02.2019). [Order of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation №298 (31.07.200) “On the establishment of the joint governmental system of the control and accounting of the individual doses of the citizens” Available from: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_98143/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_98143/) (Accessed 06.02.2019)].

<sup>6</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.]

<sup>7</sup> МУ 2.6.1.3151-13. Оценка и учет эффективных доз у пациентов при проведении радионуклидных диагностических исследований. М.: Роспотребнадзор, 2013 35 с. [Methodical guidelines 2.6.1.3151-13 “Assessment and control of the patient effective doses from nuclear medicine examinations”. Moscow, Rosпотребнадзор, 2013, 35 p.]

зиметры отсутствуют или являются неисправными даже на аппаратах для рентгеноскопических и рентгенохирургических исследований [48]. Данное обстоятельство существенно затрудняет проведение индивидуальной дозиметрии пациентов. Подавляющее большинство аппаратов не подключено к больничным архивам цифровых изображений.

В штате отечественных МО практически полностью отсутствуют медицинские физики за пределами отделений лучевой терапии и радионуклидной диагностики. Обязанности по оценке доз облучения пациентов и подготовке данных для заполнения формы №3-ДОЗ являются прерогативой врачей-рентгенологов и рентгенлаборантов [46].

### 3. Структура современной лучевой диагностики в Российской Федерации

Современная лучевая диагностика проводится как с использованием ионизирующего излучения (рентгенорадиологические исследования), так и без него (УЗИ, МРТ и др.) [49, 50]. К рентгенорадиологическим исследованиям (РРИ) относятся: рентгенографические (в том числе и флюорографические, рентгеностоматологические и др.), рентгеноскопические, ангиографические и интервенционные, компьютерно-томографические, радионуклидные исследования и их комбинации [49–51]. По данным РГП и ЕСКИД, в 2017 г. в Российской Федерации проведено более 280 млн рентгенорадиологических процедур (в среднем 1,9 процедуры на каждого из 147 млн жителей страны). Следует отметить, что число РРИ на душу населения в РФ неуклонно растет и за последние 10 лет увеличилось на 40% [14]. Структура рентгенорадиологических исследований представлена на рисунке 1.



**Рис. 1.** Вклад различных видов лучевой диагностики в общее число РРИ в Российской Федерации в 2017 г. по данным формы №3-ДОЗ<sup>8</sup>

[Fig. 1. Contribution of different imaging modalities to the total number of X-ray examinations in the Russian Federation in 2017 based on the 3-DOZ data<sup>8</sup>]

Наиболее распространенными в РФ являются рентгенографические исследования, выполняющиеся практически в каждой медицинской организации. Они вносят около 65% в общее число РРИ. К рентгенографическим исследованиям следует также относить и флюорографические: если исторически флюорография представляла собой получение изображения органов грудной клетки на фотопленку (в отличие от рентгеновской пленки для остальных видов исследований), то за последнее десятилетие количество аналоговых флюорографов сократилось до статистически малых величин [49, 50]. Современные флюорографы представляют собой полноценные цифровые рентгеновские аппараты. Флюорографические исследования являются вторыми по количеству выполняемых в РФ – их вклад в общее число РРИ составляет около 30%.

В зарубежных странах число рентгенографических исследований сокращается, их вытесняет компьютерная томография. Следует также отметить практически полное отсутствие флюорографии (за исключением Великобритании и отдельных восточноевропейских стран) [12, 42, 43].

Вторым среди традиционных методов лучевой диагностики является рентгеноскопия – получение рентгеновского изображения в динамике (непрерывного просвечивания пациента) с применением рентгеноконтрастных средств. При этом в отечественной практике к рентгеноскопии относят преимущественно исследования желудочно-кишечного тракта, желчного пузыря, почек и легких; в зарубежной к этому списку добавляются еще и ангиографии (исследования сосудов с внутривенным контрастом) [49–51]. В Российской Федерации эти виды исследований традиционно относят к специальным и объединяют с интервенционными исследованиями. За последние десять лет число рентгеноскопических исследований в РФ сокращается за счет вытеснения другими видами лучевой (КТ, МРТ, УЗИ) и инструментальной диагностики (ФГДС, колоноскопия и пр.) [14]. На 2017 г. вклад рентгеноскопии в общее число исследований составил менее 1%. В зарубежных странах рентгеноскопические исследования значительно более распространены (вклад в общее число исследований около 3%); их число поддерживается примерно на одном уровне [42, 52].

Специальные методы исследований включают в себя интервенционные и рентгенхирургические РРИ, при которых осуществляются хирургические и/или инвазивные процедуры под контролем рентгеновского излучения [49–53]. Данные методы исследований в РФ вносят крайне незначительный вклад в число исследований (0,5%); в зарубежных странах они более распространены (около 1%) [42, 43, 52]. Особенностью данного вида лучевой диагностики является крайне высокая продолжительность облучения пациента (до 40 минут), что приводит к высоким (до 1 Гр) поглощенным дозам в коже пациента; нередки случаи детерминированных эффектов (эритемы, язвы, некроз тканей) [53].

<sup>8</sup> Методические рекомендации «Заполнение формы федерального государственного статистического наблюдения № 3-ДОЗ»: [http://www.niirg.ru/PDF/MR\\_3-DOS\\_2013.pdf](http://www.niirg.ru/PDF/MR_3-DOS_2013.pdf) (Дата обращения: 06.02.2019). [Methodical recommendations "Filling the form of the federal governmental statistical surveillance 3-DOZ". -Available from: [http://www.niirg.ru/PDF/MR\\_3-DOS\\_2013.pdf](http://www.niirg.ru/PDF/MR_3-DOS_2013.pdf) (Accessed 06.02.2019).]

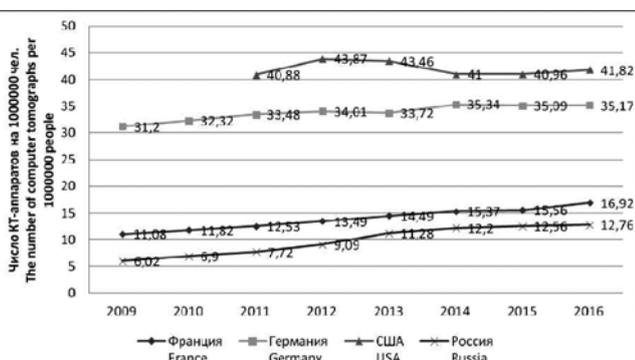
На 2017 г. радионуклидная диагностика составляла 0,2% от общего числа РРИ в РФ; в зарубежных странах радионуклидные методы намного более распространены (1–5%) [42, 43, 52, 54]. В РФ преобладают традиционные методы РНД – сцинтиграфия, однофотонная эмиссионная компьютерная томография [15, 17]. В последние годы получила распространение позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ), которая применяется также в сочетании с компьютерной томографией (ПЭТ/КТ) [18, 19].

Наиболее современным методом лучевой диагностики является компьютерная томография (КТ), позволяющая получать трехмерное рентгеновское изображение выбранной анатомической области. КТ широко распространена в зарубежных странах (около 10% вклада в общее число исследований в странах Евросоюза, около 20% – в США) [1, 42, 43, 52, 54]; в РФ данный вид диагностики начал развиваться сравнительно недавно. На 2017 г. вклад КТ в общее число исследований составил около 4% (с ростом примерно на 0,5% в год) [14, 20]. Динамика изменения числа КТ исследований и оснащенности компьютерными томографами в РФ и зарубежных странах соответственно в период 2009–2017 гг. представлена на рисунках 2 и 3 соответственно [14, 52, 54].



**Рис. 2.** Динамика роста числа КТ-исследований на 1000 чел. в РФ и зарубежных странах в 2009–2016 гг.

**[Fig. 2.** Trends of the increase in the number of CT scans per 1000 people in the Russian Federation and foreign countries in 2009–2016]



**Рис. 3.** Динамика роста оснащенности компьютерными томографами в РФ и в зарубежных странах в 2009–2016 гг.

**[Fig. 3.** Trends of the increase in the number of CT units in the Russian Federation and foreign countries in 2009–2016]

Представленные результаты свидетельствуют о существенном отставании РФ от зарубежных стран по обоим представленным показателям. Также следует отметить, что в зарубежных странах КТ выполняется не только для диагностики, но и в профилактических целях [55–59]. Так, компьютерная томография используется для скрининга рака легких и для выявления коронарного атеросклероза [55–59]. Данные виды скрининга достаточно широко распространены в Европе и США; результаты клинических испытаний подтвердили достоверное увеличение выявляемости данных патологий у пациентов, входящих в группы риска. В Российской Федерации использование КТ в скрининговых целях находится на этапе клинической апробации в отдельных медицинских организациях [58, 60].

Целесообразно оценить структуру лучевой диагностики в различных регионах Российской Федерации по наиболее современному и высокодозовому методу лучевой диагностики – компьютерной томографии и интервенционным (специальным) исследованиям. По сведениям, представленным в форме №3-ДОЗ за 2017 г., максимальное количество КТ-исследований в Российской Федерации выполнялось в г. Москве – 1496,3 тыс. ед., что составляет почти 10% от всех КТ исследований в стране. Далее следуют Краснодарский край (598 тыс. ед.), г. Санкт-Петербург (510 тыс. ед.), Республика Башкортостан (353 тыс. ед.), Свердловская область (338,5 тыс. ед.) и Московская область (291,7 тыс. ед.). В этих шести регионах выполняется треть всех КТ-исследований в Российской Федерации. Соответствующий вклад КТ-исследований в структуру лучевой диагностики в данных регионах варьирует от 2,5% (Московская область) до 5,5% (г. Москва).

Также следует выделить регионы с максимальным процентным вкладом КТ-исследований в общее число исследований: на первом месте находится Ульяновская область (6,6%); далее следуют Краснодарский край (5,8%), Томская область (5,7%), Республика Мордовия (5,6%), г. Москва и Республика Башкортостан (5,5%), Ханты-Мансийский и Ямало-Ненецкий автономные округа (5,2%).

Минимальное количество КТ-исследований в 2017 г. было выполнено в Республике Алтай (6,8 тыс. ед. – 1,3%), Республике Северная Осетия – Алания (6,6 тыс. ед. – 0,7%) Еврейской автономной области (3,6 тыс. ед. – 1,5%), Чукотском автономном округе (3,6 тыс. ед. – 3,6%) и Ненецком автономном округе (2,4 тыс. ед. – 2,4%).

Максимальное количество интервенционных исследований в 2017 г. было выполнено в г. Москве (186,6 тыс. ед.), Краснодарском крае (100,1 тыс. ед.), Красноярском крае (88,7 тыс. ед.), Свердловской области (71,4 тыс. ед.), г. Санкт-Петербурге (67,8 тыс. ед.) и Кемеровской области (66,8 тыс. ед.) – около половины от всех интервенционных исследований, выполненных в стране. Соответствующий вклад в структуру лучевой диагностики составил от 0,5% до 1,5%. Минимальное количество интервенционных исследований (меньше одной тысячи) было выполнено в Амурской и Тверской областях, Республиках Крым, Тыва и Марий Эл. В ряде регионов Российской Федерации интервенционные исследования в структуре лучевой диагностики отсутствуют.

Данные показатели свидетельствуют о крайне неравномерной структуре лучевой диагностики в Российской Федерации и позволяют выделить те регионы, в которых совершенствование системы радиационной защиты в медицине будет наиболее результативным.

#### 4. Уровни облучения в лучевой диагностике

Результирующим показателем уровня лучевой нагрузки на население страны является коллективная доза облучения. В 2017 г. коллективная доза медицинского облучения населения составила 80,3 тыс. чел.×Зв, – 14,13% от коллективной дозы от всех источников облучения (568,2 тыс. чел.×Зв). Динамика изменения коллективной дозы населения Российской Федерации от медицинского облучения за последние годы представлена на рисунке 4 [14].

Как следует из рисунка 4, с 2000 по 2013 г. коллективная доза медицинского облучения населения России снизилась практически в два раза, однако с 2014 г. наметился некоторый рост коллективной дозы. Данная тенденция обусловлена как увеличением вклада высокодозовых исследований (компьютерной томографии и радионуклидной диагностики, в том числе и гибридных методов исследований), так и увеличением численности жителей Российской Федерации (с 143,7 млн чел. до 146,8 млн чел. [61]).

Структура коллективной дозы медицинского облучения населения РФ за 2017 г. представлена на рисунке 5.

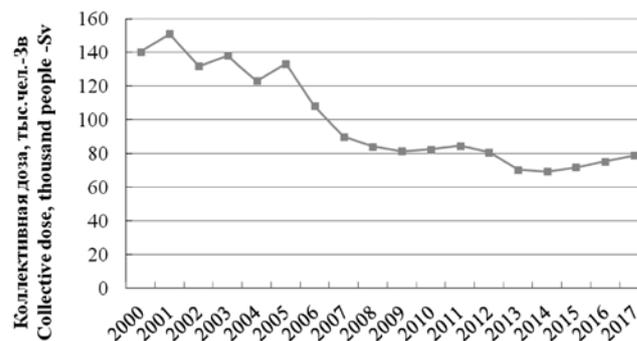
Несмотря на то, что рентгенография и флюорография вносит преобладающий вклад в число РРИ, их вклад в коллективную дозу составляет 23,3% и 7,6% соответственно. Первое место по величине вклада в коллективную дозу занимает КТ – 50,5%, хотя количество процедур является довольно низким (3,64%). Вклад в коллективную дозу КТ постоянно увеличивается; ожидается, что он будет увеличиваться и дальше. Динамика вклада основных видов РРИ в коллективную дозу от медицинского облучения в период 2000–2017 гг. представлена на рисунке 6.

Увеличение вклада КТ в коллективную дозу компенсируется снижением вкладов традиционных видов исследований: рентгеноскопии, рентгенографии, флюорографии, что обусловлено как сокращением числа выполняемых исследований (для рентгеноскопии), так и снижением индивидуальных доз облучения (для рентгенографии и флюорографии). Вклад радионуклидной диагностики остается практически неизменным с тенденцией к увеличению.

Нами проведено сравнение вклада различных видов лучевой диагностики в коллективную дозу в Российской Федерации и в европейских государствах, основываясь на данных, представленных в публикации Европейской комиссии №180 [42] и сведениях Европейской статистической комиссии [52]. К сожалению, для остальных стран с развитой системой здравоохранения актуальные данные отсутствуют. Результаты представлены на рисунке 7.

Из данных, представленных на рисунке 7, следует, что структура коллективной дозы в РФ отличается от развитых стран Западной Европы и может быть сравнима только с отдельными восточноевропейскими странами (Польша, Болгария, Венгрия). Обращает на себя внимание значительный вклад рентгенографических исследований, максимальный для всех рассматриваемых государств, – около 30%. Напротив, вклад компьютерной томографии значительно более низкий, чем в большинстве европейских стран.

Следующей характеристикой текущего состояния лучевой диагностики являются средние эффективные дозы облучения пациента от отдельных РРИ. Результаты оценки как по данным исследований, проведенных специалистами ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, так и по итогам обработки формы 3-ДОЗ за 2017 г., представлены в таблице 1.



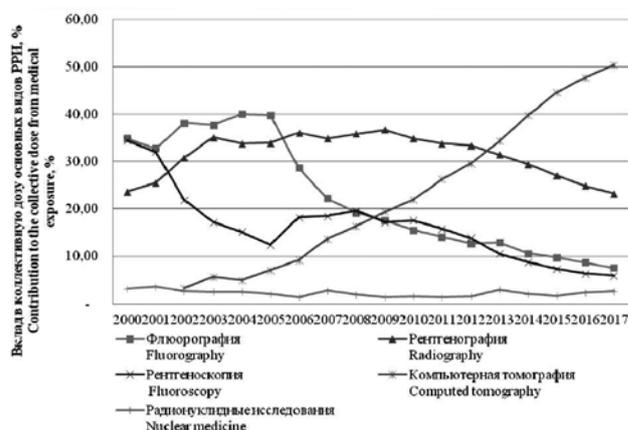
**Рис. 4.** Динамика изменения коллективной дозы населения Российской Федерации от медицинского облучения за период 2000–2017 гг.

[Fig. 4. Trend of the development of the collective dose of the public of the Russian Federation from medical exposure in 2000–2017]



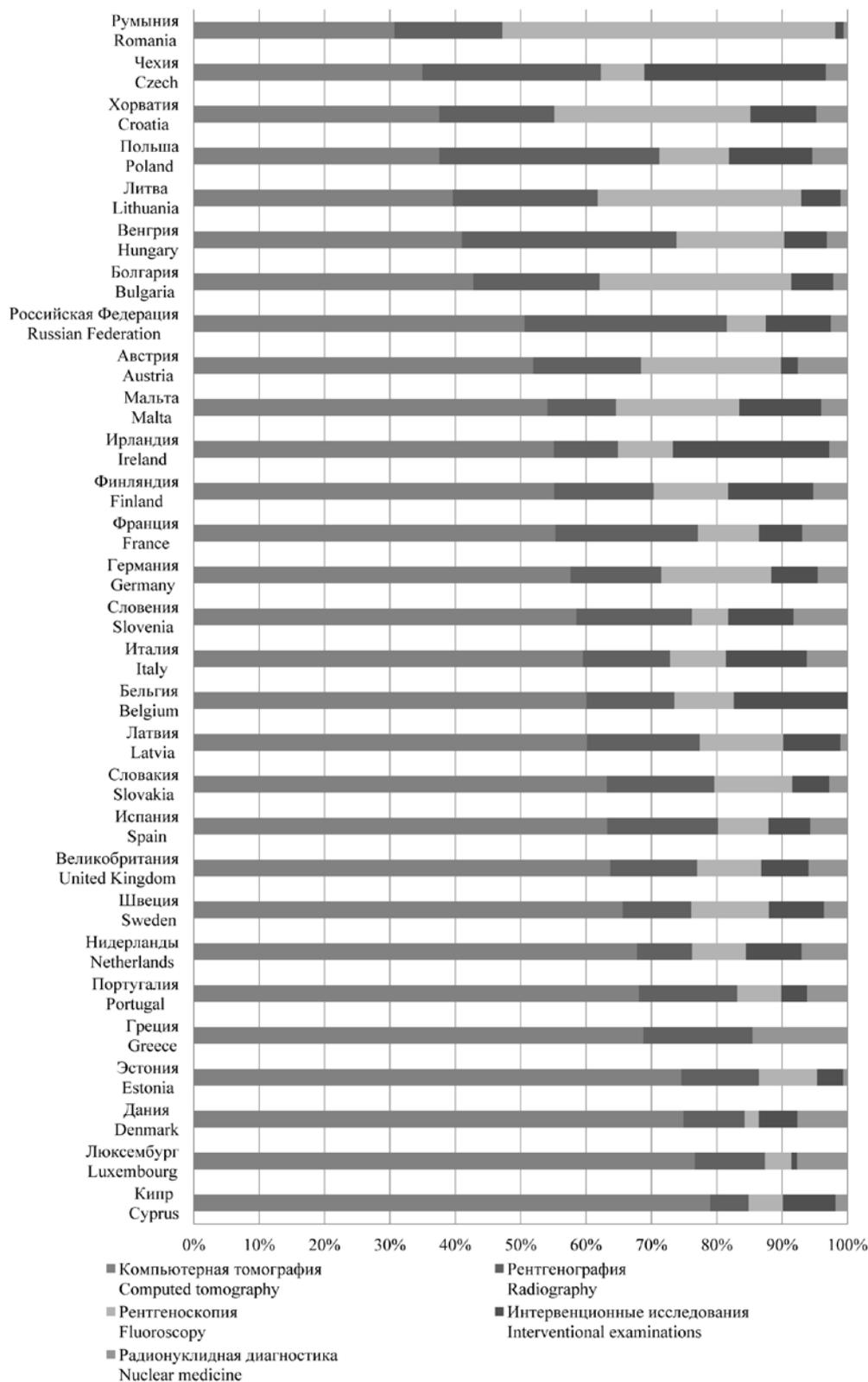
**Рис. 5.** Вклад различных видов лучевой диагностики в коллективную дозу медицинского облучения в Российской Федерации в 2017 г. по данным формы №3-ДОЗ

[Fig. 5. Contribution of different imaging modalities to the collective dose from medical exposure in the Russian Federation in 2017 based on the 3-DOZ data]



**Рис. 6.** Динамика изменения вклада различных видов РРИ в коллективную дозу от медицинского облучения в период 2000–2017 гг.

[Fig. 6. Trends of changes in the contribution of different imaging modalities to the collective dose from medical exposure in 2000–2017]



\* для РФ флюорография объединена с рентгенографией; интервенционные объединены с прочими исследованиями.

[\* for the Russian Federation, fluorography is combined with radiography; interventional examinations combined with "other" examinations]

**Рис. 7.** Сравнение структуры коллективной дозы от медицинского облучения в Российской Федерации и странах Евросоюза.

Страны расположены в порядке увеличения процентного вклада компьютерной томографии

**[Fig. 7.** Comparison of the structure of the collective dose from medical exposure in the Russian Federation and EU countries. The countries are arranged in order of increase of the contribution of computed tomography]

## Средние эффективные дозы для наиболее распространенных видов РПИ, мЗв

[Table 1]

## Average effective doses for the most common types of X-ray examinations, mSv

Процедура/исследование [Procedure/examination]	Данные собственных исследований ФБУН НИИРГ, 2009–2015 [15, 48] [Home IRH data collection, 2009–2015 [15, 48]]	Форма №3-ДОЗ, 2017 [3-DOZ Form, 2017]
<i>Рентгенография</i> [Radiography]		
Череп [Skull]	0,09	0,06
Органы грудной клетки [Chest]	0,18	0,12
Шейный отдел позвоночника [Cervical spine]	0,14	0,13
Грудной отдел позвоночника [Thoracic spine]	0,60	0,36
Пояснично-крестцовый отдел позвоночника [Lumbosacral spine]	1,2	0,59
Брюшная полость [Abdomen]	1,0	0,75
Таз [Pelvis]	1,0	0,6
<i>Компьютерная томография</i> [Computed tomography]		
Голова [Head]	1,8	1,7
Грудная клетка [Chest]	6,5	5,0
Брюшная полость [Abdomen]	9,0	7,3
Таз [Pelvis]	12	6,3
<i>Интервенционные исследования</i> [Interventional examinations]		
Коронарная ангиография [Coronary angiography]	15	6,0
<i>Рентгеноскопия</i> [Fluoroscopy]		
Верхний отдел ЖКТ (пищевод/желудок) [Upper gastrointestinal tract (esophagus / stomach)]	1,4/6,7	2,3
Нижний отдел ЖКТ (кишечник) [Lower gastrointestinal tract (intestine)]	9,6	4,8

Результаты сравнения свидетельствуют, что средние эффективные дозы на исследование, полученные специалистами ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева по всем представленным процедурам или исследованиям, выше, чем дозы, представляемые в форме №3-ДОЗ. Для ряда исследований (КТ таза, коронарная ангиография, рентгеноскопия нижнего отдела ЖКТ), дозы облучения, полученные в собственных исследованиях, выше более чем в два раза.

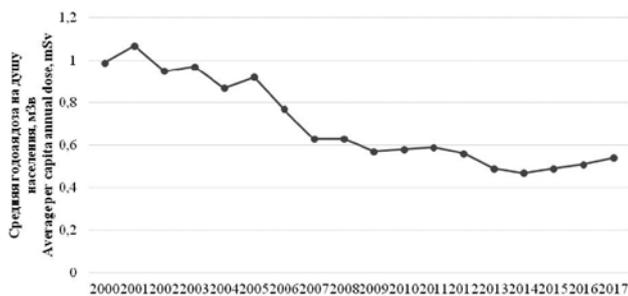
Особенностью ядерной медицины, с точки зрения радиационной безопасности, является наличие внутреннего облучения пациента от вводимого РФП. Дозы внутреннего облучения пациентов в радионуклидной диагностике варьируют от 0,1 до 10 мЗв за исследование [17, 18]. В случае проведения совмещенных исследований с рентгеновской КТ дозы пациентов увеличиваются за счет внешнего облучения. Так, доза от совмещенного ПЭТ/КТ-исследования всего тела в среднем составляет 17 мЗв, при этом наибольший вклад в дозу вносит КТ-сканирование, доза пациента увеличивается до 40 мЗв при проведении многофазной КТ [18, 19].

Одним из важных показателей в оценке медицинского облучения является средняя годовая эффективная доза жителя страны. В Российской Федерации после некоторой стабилизации в 2013–2015 гг. на уровне 0,45–0,48 мЗв средняя годовая эффективная доза на душу населения с 2016 г. имеет тенденцию роста и в 2017 г. составила 0,54 мЗв (рис. 8).

Как следует из данных, представленных на рисунке 8, практически во всех странах ЕС средняя годовая эффективная доза на душу населения, а также доза от КТ, значительно превосходят аналогичную дозу для населения РФ.

Также нами проведен анализ уровня и структуры средних доз от медицинского облучения на душу населения для различных видов РПИ в Российской Федерации и европейских странах (рис. 9).

В отдельных крупных медицинских центрах РФ выполняются (или находятся на стадии клинической апробации) современные виды рентгенодиагностических исследований, которые еще не вошли в форму №3-ДОЗ.



**Рис. 8.** Динамика средней годовой эффективной дозы на душу населения Российской Федерации

**[Fig. 8.** Dynamics of the average annual per capita effective dose of the public of the Russian Federation]

В таблице 2 представлены значения средних эффективных доз для современных/перспективных видов РРИ по зарубежным данным.

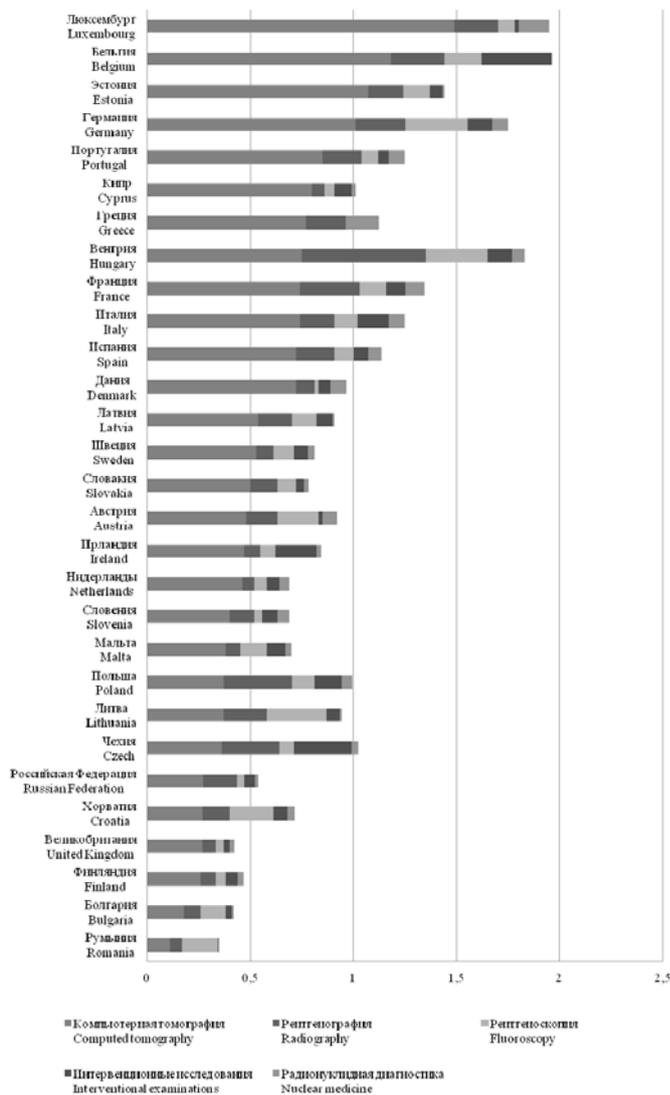
Широкое внедрение современных методов РРИ в Российской Федерации существенно скажутся на структуре лучевой диагностики и дозах медицинского облучения населения страны.

На основе представленных данных нами выполнены прогностические оценки возможного изменения структуры лучевой диагностики и ассоциированного с этим изменения коллективной дозы в Российской Федерации от медицинского облучения. Первый сценарий заключается в изменении структуры лучевой диагностики (числа тех или иных РРИ на 1000 человек населения) в соответствии со средними значениями для стран Евросоюза с сохранением отечественных средних доз на процедуру/исследование. Второй сценарий – изменение структуры лучевой диагностики в соответствии со средними значениями для стран Евросоюза и со средними дозами на процедуру/исследование для стран Евросоюза. Исходные данные для расчета представлены в таблице 3.

Результаты расчета изменения коллективной дозы для обоих сценариев представлены в таблице 4. При этом для РФ были сделаны следующие допущения: флюорография учитывалась совместно с рентгенографией; прочие исследования были объединены со специальными.

Результаты сравнения показывают, что при переходе к структуре лучевой диагностики, определенной как средняя по всем странам Евросоюза, увеличение коллективной дозы от медицинского облучения МО составит порядка 10% (8,5 тыс. чел×Зв). Увеличение вклада в коллективную дозу от современных видов РРИ (КТ, РНД) будет компенсировано резким снижением вклада рентгенографии и интервенционных (специальных) исследований. Если изменение структуры лучевой диагностики будет сопровождаться изменениями в величинах средних доз за исследование (аналогично сведениям по Евросоюзу), то коллективная доза от медицинского облучения увеличится практически в два раза (с 79 тыс. чел×Зв до 149 тыс. чел×Зв).

Использование Евросоюза в качестве объекта сравнения с Российской Федерацией оправдано в связи с крайне неоднородным уровнем экономического развития и состоянием лучевой диагностики в странах – членах Евросоюза (параллель с неоднородным состоянием



**Рис. 9.** Сравнение структуры средних эффективных доз от медицинского облучения на душу населения, мЗв, для различных видов РРИ в Российской Федерации и европейских странах. Страны расположены в порядке уменьшения доз облучения от компьютерной томографии

**[Fig. 9.** Comparison of the structure of average per capita effective doses from medical exposure, mSv, for different imaging modalities in the Russian Federation and European countries. Countries are arranged in order of decrease of the contribution of computed tomography]

лучевой диагностики в различных субъектах Российской Федерации).

### Заключение

Рентгенорадиологические методы исследования во всем мире продолжают развиваться и остаются одним из основных методов диагностики. Происходит совершенствование существующих методов визуализации путем применения новых алгоритмов, а также комбинирования и совмещений существующих методов.

Число РРИ на душу населения и в Российской Федерации, и во всем мире ежегодно увеличивается.

Таблица 2

**Эффективные дозы от современных/перспективных видов РРИ**

[Table 2]

**Effective doses from the existing / prospective x-ray examinations]**

Вид РРИ [Type of x-ray examination]	Эффективная доза, мЗв [Effective dose, mSv]	Источник [Source]
Скрининговые исследования [Screening]		
Низкодозовая компьютерная томография для скрининга рака легких [Low-dose computed tomography for lung cancer screening]	1,0–1,5	Водоватов [62] [Vodovатов [62]] Karostik и др. [63] [Karostik et al. [63]] Mazzone и др. [64] [Mazzone et al. [64]]
КТ-коронарография [CT-coronarography]	0,8–10,5	Водоватов [62] [Vodovатов [62]] Kim и др. [65] [Kim et al. [65]]
Томосинтез молочной железы [Breast tomosynthesis]	0,5–1,5	Svahn и др. [32] [Svahn et al. [32]]
Томосинтез органов грудной клетки [Chest tomosynthesis]	0,13	Bath и др. [34] [Bath et al. [34]]
ПЭТ-скрининг всего тела [Whole-body PET Screening]	4,4	Murano и др. [35] [Murano et al. [35]]
ПЭТ/КТ-скрининг всего тела [Whole-body PET/CT Screening]	13,5	Murano и др. [35] [Murano et al. [35]]

Таблица 3

**Сравнение числа исследований и средней дозы на исследование в РФ и Евросоюзе**

[Table 3]

**Comparison of the number of examinations and the average dose per examination in the Russian Federation and the European Union]**

Параметр [Parameter]	Рентгенография [Radiography]	Рентгено-скопия [Fluoroscopy]	КТ [CT]	Интервенционные исследования [Interventional examinations]	Радионуклидная диагностика [Nuclear medicine]
Число исследований на 1000 чел., Евросоюз, ед. [Number of examinations per 1000 people, EU, units]	929,7	29,9	93,7	6,9	12,2
Средняя доза на процедуру/исследование, Евросоюз, мЗв [Average dose per procedure/examination, EU, mSv]	0,2	3,9	6,3	14,0	4,1
Число исследований на 1000 чел., РФ, ед. [Number of examinations per 1000 people, RF, units]	1813,1	12,3	69,5	9,4	3,5
Средняя доза на процедуру/ исследование, РФ, мЗв [Average dose per procedure/examination, RF, mSv]	0,1	2,6	3,9	5,7	3,9

**Результаты оценки изменения коллективной дозы от медицинского облучения в РФ при изменении структуры лучевой диагностики и средних эффективных доз за исследование**

**Results of the assessment of the changes in the collective dose from medical exposure in the Russian Federation after the transformation of the structure of X-ray diagnostics and average effective doses per examination]**

Структура коллективной дозы [Structure of the collective dose]	Коллективная доза от вида лучевой диагностики, чел*Зв [Collective dose from the imaging modality, man- sV]					Всего [Total]
	Рентгенография [Radiography]	Рентгено-скопия [Fluoroscopy]	КТ [CT]	Интервенционные исследования [Interventional examinations]	Радионуклидная диагностика [Nuclear medicine]	
Текущее состояние [Current state]	24368,5	4701,3	39894,2	8063,3	2014,7	79042
Текущее состояние, % [Current state, %]	30,83%	5,95%	50,47%	10,2%	2,55%	100%
С изменением структуры исследования [With a change in the structure of the examination]	9613,2	11424,8	53809,5	5772,4	6951,2	87571,2
С изменением структуры исследования, % [With a change in the structure of the examination, %]	11%	13%	61%	7%	8%	100%
С изменением структуры исследований и средней дозы на исследование [With a change in the structure of examinations and the average dose from the examination]	24722,9	17228,0	86157,6	14204,6	7307,4	149620,5
С изменением структуры исследований и средней дозы на исследование, % [With a change in the structure of examinations and the average dose from the examination, %]	17%	12%	58%	9%	5%	100%

Самыми быстрыми темпами растет количество компьютерных томографий. И хотя в Российской Федерации их доля в структуре лучевой диагностики в 2017 г. составила всего 3,64%, вклад в коллективную дозу облучения КТ уже превалирует и составил 50,47%.

В нашей стране традиционно на протяжении многих лет превалируют рентгенография и флюорография, которые вместе составляют 94,99% от всех РРИ, а их доля в коллективной дозе составляет 30,83%.

По сравнению со странами Евросоюза и США, в структуре лучевой диагностики в Российской Федерации чрезвычайно низкая доля КТ, радионуклидных и интервенционных исследований.

К особенностям медицинского облучения в Российской Федерации относятся почти в два раза более низкие средние индивидуальные дозы облучения от РРИ по сравнению со странами Евросоюза. Наиболее значимы различия для компьютерной томографии (3,9 мЗв в РФ и 6,3 мЗв в ЕС) и интервенционных исследований (5,7 мЗв в РФ и 14,0 мЗв в ЕС).

По состоянию на 2017 г. коллективная доза медицинского облучения населения РФ составила 80,3 тыс. чел.Зв. Первое место по величине вклада в коллективную дозу занимает КТ – 50,5%, при вкладе в структуре исследований всего 3,64%. Вклад в коллективную дозу КТ постоянно увеличивается. Ожидается, что он будет увеличиваться и дальше. Несмотря на то, что рентгенография и флюорография вносит преобладающий вклад в число РРИ, их вклад в коллективную дозу составляет 23,3% и 7,6% соответственно.

В крупных медицинских центрах Российской Федерации в последние годы интенсивно внедряются новейшие методы исследований, такие как ПЭТ/КТ, ОФЭКТ/КТ, проходят апробацию низкодозовая компьютерная томография для скрининга рака легких и КТ-коронарография, томосинтез молочной железы и органов грудной клетки, ПЭТ/КТ-скрининг всего тела.

Несомненно, данные виды РРИ внесут свой вклад в совершенствование лучевой диагностики, но также приведут и к росту дозовой нагрузки на население страны. Тренды развития лучевой диагностики в мире по-

звolyют сделать некоторые прогнозы применительно к Российской Федерации:

– неуклонное увеличение вклада современных высокоинформативных методов лучевой диагностики, таких как КТ, интервенционные исследования и РНД (примерно на 0,5% ежегодно);

– рост в два раза коллективной дозы от медицинского облучения в ближайшее десятилетие как за счет увеличения доли высокодозных исследований, так и роста средних доз на исследование, сравнимых со средними по ЕС.

## Литература

- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Sources and Effects of Ionising Radiation. UNSCEAR 2008. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. – New York, UN-2010.-Volume I. – Annex A.
- World Health Organization/Global initiative on Radiation Safety in Healthcare Settings. World Health Organization. Technical meeting report. Geneva, 2008, 100 p.
- International Atomic Energy Agency, World Health Organization. Bonn call for action. International Atomic Energy Agency, World Health Organization. 10 Action to Improve Radiation Protection in Medicine in the Next Decade: [https://www.who.int/ionizing\\_radiation/medical\\_radiation\\_exposure/BonnCallforAction2014.pdf](https://www.who.int/ionizing_radiation/medical_radiation_exposure/BonnCallforAction2014.pdf) (Дата обращения: 06.02.2019).
- Публикация 103 Международной Комиссии по Радиационной защите (МКРЗ) / пер. с англ., под общ. ред. М.Ф. Киселева, Н.К. Шандалы. – М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. – 312 с.
- Публикация 105 Международной Комиссии по Радиационной защите (МКРЗ) / под редакцией Д. Валентина; редактор русского перевода М.И. Балонов. – СПб.: ФГУН НИИРГ, 2011. – 66 с.
- Международное Агентство по Атомной Энергии. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности / Международное Агентство по Атомной Энергии // Серия норм МАГАТЭ по безопасности. – Вена, IAEA, 2015. – № GSR Part 3. – 518 с.
- International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and safety in medical uses of ionizing radiation. International Atomic Energy Agency. Specific safety guide. Vienna, IAEA, 2018, №SSG-46, 340 p.
- Samei E. [et. al.] Medical Imaging Dose Optimization from Ground up: Expert Opinion of an International Summit. *J. Radiol. Prot.*, Vol. 38(3), 2018, pp. 967-989.
- Järvinen H., Vassileva J., Samei E., Wallace A., Vano E. and Rehani M. Patient dose monitoring and the use of diagnostic reference levels for the optimization of protection in medical imaging: current status and challenges worldwide. *Journal of Medical Imaging*, 2017, Vol. 4(3), pp. 031214.
- Toma P. [et. al.] Radiation exposure in diagnostic imaging: wisdom and prudence, but still a lot to understand. *Radiol. Med.*, 2017, Vol. 122, pp.215-220.
- Frush D.P., Perex M.D.R. Children, medical radiation and the environment: An important dialogue. *Environmental Research*, 2017, Vol. 156, pp. 358-363.
- Rehani M., Vassileva J. Survey of imaging technology and patient dose recording practice in developing countries. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 2018, Vol. 181(3), pp. 240-245. doi: 10.1093/rpd/ncy019
- Järvinen H., Vassileva J., Samei E., Wallace A., Vano E., Rehani M. Patient dose monitoring and the use of diagnostic reference levels for the optimization of protection in medical imaging: current status and challenges worldwide. *J Med Imaging*, 2017, Vol. 4(3), pp. 312-314. doi: 10.1117/1.JMI.4.3.031214
- Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2017 год: радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации. – М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2018. – 128 с.
- Balonov M., Golikov V., Zvonova I., Chipiga L., Kalnitsky S., Sarycheva S., Vodovatov A. Patient doses from medical examinations in Russia: 2009–2015 *J. Radiol. Prot.*, Vol. 38, pp. 121-140. doi:<https://doi.org/10.1088/1361-6498/aa9b99>
- Балонов, М.И. Современные уровни медицинского облучения в России / М.И. Балонов, В.Ю. Голиков, И.А. Звонова, С.А. Кальницкий, В.С. Репин, С.С. Сарычева, Л.А. Чипига // Радиационная гигиена. – 2015. – Т.8. – №3. – С. 67-79.
- Zvonova I.A., Chipiga L.A. Trends on medical exposure and radiation protection in nuclear medicine in Russia. *Proceedings of International Conference on Radiation Protection in Medicine: Achieving Change in Practice*. Vienna, 2017. IAEA, book of contributions, pp. 188 – 192: <https://www.iaea.org/sites/default/files/18/02/rpop-session4.pdf> (Дата обращения: 06.02.2019).
- Чипига, Л.А. Уровни облучения пациентов и возможные пути оптимизации ПЭТ-диагностики в России / Л.А. Чипига, И.А. Звонова, Д.В. Рыжкова, М.А. Меньков, М.Б. Долгушин // Радиационная гигиена. – 2017. – Т.10. – №4. – С. 31-43: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-4-31-43> (Дата обращения: 06.02.2019).
- Chipiga L., Vodovatov A., Zvonova I., Bernhardsson C. Assessment of patient doses and possible approaches for implementation of optimization procedures in PET/CT examinations in the Russian Federation. *Proceedings of the 13th international conference on «Medical Physics in the Baltic States»* (Kaunas, 9-11 November 2017), 2017, pp. 36 – 40.
- Chipiga L.A., Bernhardsson C. Patient doses in Computed Tomography examinations in two regions of the Russian Federation. *Rad. Prot. Dos.*, 2016, Vol. 169(1-4), pp. 240-244.
- Тернова, С.К. Перспективы развития методов лучевой диагностики. Аналитический обзор / С.К. Тернова, В.Е. Синицын: <https://rosoncweb.ru/library/radiodiagnosics/002.php> (Дата обращения: 06.02.2019).
- Тернова, С.К. Развитие компьютерной томографии и прогресс лучевой диагностики / С.К. Тернова, В.Е. Синицын // Радиология-практика. – 2005. – №4. – С. 23-29.
- Маткевич, Е.И. Основные направления снижения дозы облучения пациентов при компьютерной томографии / Е.И. Маткевич, В.Е. Синицын, М.И. Зеликман, С.А. Кручинин, И.В. Иванов // *REJR*. – 2018. – Т.8. – №3. – С. 60-73. doi:10.21569/2222-7415-2018-8-3-60-73.
- Breast Tomosynthesis. Considerations for Routine Clinical Use: <http://www.wishmd.com/wp-content/uploads/2016/04/tomo-white-paper.pdf> (Дата обращения: 16.02.2019).
- ICRP, 2015. Radiological Protection in Cone Beam Computed Tomography (CBCT). ICRP Publication 129. *Ann. ICRP* 44(1).
- Dawood A., Patel S., Brown J. Cone beam CT in dental practice. *Br Dent J.*, 2009, Vol. 207(1), pp.23-28. doi: 10.1038/sj.bdj.2009.560.
- De Marneffe M., Milicevic M., Milicevic M. Cone Beam CT. New tool in diagnostic imaging. *Rev Med Liege*, 2017, Vol. 72(10), pp. 457-461.
- Vetter S.Y., Steffen K., Swartman B. [et. al.] Influence of intraoperative conventional fluoroscopy versus cone beam CT on long-term clinical outcome in isolated displaced talar fractures. *J Orthop Surg Res*, 2019, Vol. 14(1), pp. 8. doi: 10.1186/s13018-018-1043-3.
- Goo H.W., Goo J.M. Dual-Energy CT: New Horizon in Medical Imaging. *Korean J Radiol*, 2017, Vol. 18(4), pp. 555-569. doi: 10.3348/kjr.2017.18.4.555
- Xie Z.Y., Chai R.M., Ding G.C., Liu Y., Ren K. T and N Staging of Gastric Cancer Using Dual-Source Computed Tomography.

- Gastroenterol Res Pract., 2018, Vol. 4, pp. 5015202. doi: 10.1155/2018/5015202
31. Greffier J., Pereira F.R., Viala P., Macri F., Beregi J.P., Larbi A. Interventional spine procedures under CT guidance: How to reduce patient radiation dose without compromising the successful outcome of the procedure? *Phys Med.*, 2017, Vol. 35, pp. 88-96. doi: 10.1016/j.ejmp.2017.02.016
  32. Svahn T.M., Houssami N., Sechopoulos I., Mattsson S. Review of radiation dose estimates in digital breast tomosynthesis relative to those in two-view full-field digital mammography. *The BREAST*, 2015, Vol. 24(2), pp. 93-99.
  33. Helvie M.A. Digital Mammography Imaging: Breast Tomosynthesis and Advanced Applications. *Radiol Clin North Am.*, 2010, Vol. 48(5), pp. 917-929.
  34. Båth M., Svalkvist A., von Wrangel A., Rismyhr-Olsson H., Cederblad A. Effective dose to patients from chest examinations with tomosynthesis. *Radiat Prot Dosimetry*, 2010, Vol. 139(1-3), pp.153-8. doi: 10.1093/rpd/ncq092
  35. Murano T. [et. al.] Radiation exposure and risk-benefit analysis in cancer screening using FDG-PET: results of a Japanese nationwide survey. *Ann Nucl Med*, 2011, Vol. 25, pp. 657-666. doi: 10.1007/s12149-011-0511-1
  36. Padole A., Ali Khawaja R.D., Karla M., Singh S. CT radiation dose and iterative reconstruction techniques. *American Journal of Roentgenology*, 2015, Vol. 204, pp. 384-392. doi: 10.2214/AJR.14.13241
  37. Klink T., Obmann V., Heverhagen J., Stork A., Adam G., Begemann P. Reducing CT radiation dose with iterative reconstruction algorithms: the influence of scan and reconstruction parameters on image quality and CTDIvol. *Eur J Radiol.*, 2014, Vol. 83(9), pp. 1645-54. doi: 10.1016/j.ejrad.2014.05.033
  38. Статус и перспективы развития ядерной медицины и лучевой терапии в России на фоне мировых тенденций (аналитическая справка). – 2008: [www.oprf.ru/files/yad\\_medicine.doc](http://www.oprf.ru/files/yad_medicine.doc) (Дата обращения: 16.02.2019).
  39. Романова, С. Ядерная медицина: состояние и перспективы развития / Романова С. // *Remedium*. – 2013. – Т. 6. – С. 8-20.
  40. Stasi G., Ruoti E.M. A Critical Evaluation in the Delivery of the Ultrasound Practice: The Point of View of the Radiologist. *Italian Journal of Medicine*, 2012, Vol. 9(1), pp. 5-10: <https://doi.org/10.4081/ijtm.2015.502> (Дата обращения: 16.02.2019).
  41. Электронный ресурс: <https://www.fda.gov/Radiation-EmittingProducts/RadiationEmittingProductsandProcedures/MedicalImaging/MRI/ucm482765.htm> (Дата обращения: 16.02.2019).
  42. European Commission. Medical Radiation Exposure of the European Population. European Commission. Radiation protection, 2014, № 180, Part 1/2, 181 p.
  43. Hart D., Hillier M.C., Shrimpton P.C. HPA-CRCE-034 – Doses to Patients from Radiographic and Fluoroscopic X-ray Imaging Procedures in the UK – 2010 Review. Health Protection Agency, 2012, 87 p.
  44. Онищенко, Г.Г. Радиационно-гигиеническая паспортизация и ЕСКИД – информационная основа принятия управленческих решений по обеспечению радиационной безопасности населения Российской Федерации. Сообщение 1. Основные достижения и задачи по совершенствованию / Г.Г. Онищенко, А.Ю. Попова, И.К. Романович, А.Н. Барковский, Т.А. Кормановская, И.Г. Шевкун // *Радиационная гигиена*. – 2017. – Т.10(3). – С. 7-17: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-3-7-17> (Дата обращения: 16.02.2019).
  45. Онищенко, Г.Г. Радиационно-гигиеническая паспортизация и ЕСКИД – информационная основа принятия управленческих решений по обеспечению радиационной безопасности населения Российской Федерации. Сообщение 2. Характеристика источников и доз облучения населения Российской Федерации / Г.Г. Онищенко, А.Ю. Попова, И.К. Романович, А.Н. Барковский, Т.А. Кормановская, И.Г. Шевкун // *Радиационная гигиена*. – 2017. – Т.10(3). – С. 18-35: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-3-18-35> (Дата обращения: 16.02.2019).
  46. Водоватов, А.В. Практическая реализация концепции референтных диагностических уровней для оптимизации защиты пациентов при проведении стандартных рентгенографических исследований / А.В. Водоватов // *Радиационная гигиена*. – 2017. – Т.10(1). – С. 47-55: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-1-47-55> (Дата обращения: 16.02.2019).
  47. Водоватов, А.В. Анализ уровней облучения взрослых пациентов при проведении наиболее распространенных рентгенографических исследований в Российской Федерации в 2009–2014 гг. / А.В. Водоватов, В.Ю. Голиков, С.А. Кальницкий, И.Г. Шацкий, Л.А. Чипига // *Радиационная гигиена*. – 2017. – Т.10(3). – С. 66-75: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-3-66-75> (Дата обращения: 16.02.2019).
  48. Водоватов, А.В. Определение коэффициентов перехода от произведения дозы на площадь к эффективной дозе для рентгеноскопических исследований желудка с бариевым контрастом для взрослых пациентов / А.В. Водоватов, В.Ю. Голиков, И.Г. Камышанская, К.В. Зинкевич, К. Бернхардссон // *Радиационная гигиена*. – 2018. – Т. 11(1). – С.93-100: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-1-93-100> (Дата обращения: 16.02.2019).
  49. Bontrager K.L., Lampignano J.P. *Textbook of radiographic positioning and related anatomy*. Elsevier Mosby, 2014, 826 p.
  50. Медицинская рентгенология: технические аспекты, клинические материалы, радиационная безопасность / под ред. Р.В. Ставицкого. – М.: Норма, 2003. – 344 с.
  51. Шумутко, Б.И. Стандарты диагностики и лечения внутренних болезней. 3-е изд./ Б.И. Шумутко, С.В. Макаренко. – СПб: «Элби-СПб», 2005. – 800 с.
  52. Eurostat: your key to the European statistics: <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database> (Дата обращения: 16.02.2019).
  53. Голиков, В.Ю. Оценка доз облучения пациентов при проведении интервенционных рентгенологических исследований / В.Ю. Голиков, С.С. Сарычева, М.И. Балоню, С.А. Кальницкий // *Радиационная гигиена*. – 2009. – Т.2(3). – С. 26-31.
  54. The Organization for Economic Co-operation and Development. *Health at a Glance 2017: OECD Indicators. The Organization for Economic Co-operation and Development*. OECD Publishing, Paris, 2018, 220 p.
  55. U.S. Preventive Services Task Force. Final recommendation statement: lung cancer: screening/U.S. Preventive Services Task Force: [www.uspreventiveservicestaskforce.org/Page/Document/RecommendationStatementFinal/lung-cancer-screening](http://www.uspreventiveservicestaskforce.org/Page/Document/RecommendationStatementFinal/lung-cancer-screening). (Дата обращения: 06.02.2019).
  56. Iaccarino J.M., Clark J., Bolton R., Kinsinger L., Kelley M., Slatore C.G., Au D.H., Wiener R.S. A National Survey of Pulmonologists' Views on Low-Dose Computed Tomography Screening for Lung Cancer. *Ann. Am. Thorac. Soc.*, 2015, Vol. 12(11), pp. 1667-75.
  57. Marshall H.M., Bowman R.V., Yang I.A., Fong K.M., Berg C.D. Screening for lung cancer with low-dose computed tomography: a review of current status. *Journal of Thoracic Disease*, 2013, Vol. 5, pp. 524-539.
  58. Марьяшева, Ю.А. Роль КТ-ангиографии в обследовании пациентов с предполагаемой ишемической болезнью сердца / Ю.А. Марьяшева, В.Е. Синицын, С.К. Терновой // *Диагностическая и интервенционная радиология*. – 2010. – Т. 4. – №1. – С. 67-73.
  59. Vanhoenacker P.K., Heijnenbroek-Kal M.H., Van Heste R., Decramer I., Van Hoe L.R., Wijns W., Hunink M.G. Diagnostic performance of multidetector CT angiography for assessment of coronary artery disease: meta-analysis. *Radiology*, 2007, Vol. 244, pp. 419-428.

60. Московский скрининг рака легкого. [Электронный ресурс]: <http://medradiology.moscow/ndkt> (Дата обращения: 06.02.2019).
61. Федеральная служба государственной статистики. Демография: [http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat\\_main/rosstat/ru/statistics/population/demography/#](http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/population/demography/#) (Дата обращения: 06.02.2019).
62. Водоватов, А.В. Совершенствование норм радиационной безопасности. Часть 1: целесообразность ограничения доз медицинского облучения практически здоровых лиц / А.В. Водоватов // Радиационная гигиена. – 2018. – Т.11(3). – С. 115-124: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-3-115-124> (Дата обращения: 06.02.2019).
63. Karostik D.V., Kamyshanskaya I.G., Cheremisin V.M., Drozdov A.A., Vodovatov A.V. Evaluation of low-dose CT implementation for lung cancer screening in a general practice hospital. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series, 2018, Vol. 967. doi:10.1088/1742-6596/967/1/012006
64. Mazzone P.J. Silvestri G.A., Patel S., Kanne J.P., Kinsinger L.S., Wiener R.S., Soo Hoo G., Detterbeck F.C. Screening for Lung Cancer: CHEST Guideline and Expert Panel Report. Chest, 2018, Vol. 153 (4), pp. 954 – 985.
65. Kim K.P., Einstein A.J., de Gonzalez A.B. Coronary artery calcification screening: estimated radiation dose and cancer risk. Archives of internal medicine, 2009, Vol. 169(13), pp. 1188-1194. doi:10.1001/archinternmed.2009.162.

Поступила: 08.02.2019 г.

**Онищенко Геннадий Григорьевич** – доктор медицинских наук, профессор, академик Российской академии наук, Москва, Россия

**Попова Анна Юрьевна** – доктор медицинских наук, профессор, руководитель Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, Россия

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

**Водоватов Александр Валерьевич** – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией радиационной гигиены медицинских организаций, ведущий научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: vodovatoff@gmail.com

**Башкетова Наталия Семеновна** – руководитель Управления Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по городу Санкт-Петербургу, Санкт-Петербург, Россия

**Историк Ольга Александровна** – руководитель Управления Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Ленинградской области, Санкт-Петербург, Россия

**Чипига Лариса Александровна** – 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

**Шацкий Илья Геннадьевич** – 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

**Репин Леонид Викторович** – младший научный сотрудник информационно-аналитического центра Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

**Библин Артём Михайлович** – руководитель информационно-аналитического центра – старший научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

**Для цитирования:** Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К., Водоватов А.В., Башкетова Н.С., Историк О.А., Чипига Л.А., Шацкий И.Г., Репин Л.В., Библин А.М. Современные принципы обеспечения радиационной безопасности при использовании источников ионизирующего излучения в медицине. Часть 1. Тенденции развития, структура лучевой диагностики и дозы медицинского облучения // Радиационная гигиена. – 2019. – Т. 12, № 1. – С. 6-24. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-6-24

## Modern principles of the radiation protection from sources of ionizing radiation in medicine. Part 1: Trends, structure of x-ray diagnostics and doses from medical exposure

Onischenko G.G.<sup>1,6</sup>, Popova A. Yu.<sup>2,7</sup>, Romanovich I.K.<sup>3</sup>, Vodovatov A.V.<sup>3</sup>, Bashketova N.S.<sup>3,4</sup>, Istorik O.A.<sup>5</sup>,  
Chipiga L.A.<sup>3</sup>, Shatskiy I.G.<sup>3</sup>, Repin L.V.<sup>3</sup>, Biblin A.M.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Russian academy of sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>Federal service of surveillance on consumer rights protection and human well-being, Moscow, Russian Federation

<sup>3</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>4</sup>Federal service of surveillance on consumer rights protection and human well-being in St-Petersburg, St-Petersburg, Russian federation

<sup>5</sup>Federal service of surveillance on consumer rights protection and human well-being in Leningrad region, St-Petersburg, Russian federation

<sup>6</sup>The State Education Institution of Higher Professional Training The First Sechenov Moscow State Medical University under Ministry of Health of the Russian Federation

<sup>7</sup>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

*Implementation of modern highly informative methods of X-ray diagnostics (computed tomography, interventional examinations, nuclear medicine), associated with the increase of doses to the public and patients, requires the development and improvement of the existing system of the radiation protection from medical exposure. Despite the prevalence of the traditional imaging modalities in the structure of X-ray diagnostics in the Russian Federation (radiography and fluorography compose up to 95% out of 280 mln. X-ray examinations performed in 2017), the major contribution into the collective dose from medical exposure is due to the computed tomography (50,5%). Comparison of the structure of X-ray diagnostics in the Russian Federation with European Union indicates the absence of fluorography examinations and significantly (up to a factor of 5) higher contribution of computed tomography in European countries. An average collective dose from medical exposure in European countries is composed of 80% of computed tomography and of 10% of nuclear medicine; a mean effective dose per X-ray examination are higher up to a factor of 3 compared to Russia. The analysis of the trends of the development of the X-ray diagnostic in the Russian Federation allows predicting a further increase of the number of computer tomography, interventional and nuclear medicine examinations as well as an increase of the collective dose from medical exposure up to a factor of two in the next decade. This will be associated with changes in the structure of the X-ray diagnostics and an increase of the mean effective doses from X-ray examinations.*

**Key words:** X-ray diagnostics, collective dose, medical exposure, patient doses, effective dose, health screening examinations.

### References

- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Sources and Effects of Ionising Radiation. UNSCEAR 2008. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. – New York, UN-2010.-Volume I. – Annex A.
- World Health Organization/Global initiative on Radiation Safety in Healthcare Settings. World Health Organization. Technical meeting report, Geneva, 2008, 100 p.
- International Atomic Energy Agency, World Health Organization. Bonn call for action. International Atomic Energy Agency, World Health Organization. 10 Action to Improve Radiation Protection in Medicine in the Next Decade. – Available on: [https://www.who.int/ionizing\\_radiation/medical\\_radiation\\_exposure/BonnCallforAction2014.pdf](https://www.who.int/ionizing_radiation/medical_radiation_exposure/BonnCallforAction2014.pdf) (Accessed: 06.02.2019).
- ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: translation from English. Edited by M.F. Kiselev, N.K. Shandala. Moscow, «Alana», 2009, 312 p. (In Russian)
- ICRP, 2007. Radiological Protection in Medicine. ICRP Publication 105. Ann. ICRP 37 (6). (in Russian)
- International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards/International Atomic Energy Agency. International Basic Safety Standards – IAEA, Vienna, 2015, GSR Part 3, 518 p. (in Russian)
- International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and safety in medical uses of ionizing radiation. International Atomic Energy Agency. Specific safety guide. Vienna, IAEA, 2018, №SSG-46, 340 p.
- Samei E. [et. al.] Medical Imaging Dose Optimization from Ground up: Expert Opinion of an International Summit. J. Radiol. Prot., Vol. 38(3), 2018, pp. 967-989.
- Järvinen H., Vassileva J., Samei E., Wallace A., Vano E. and Rehani M. Patient dose monitoring and the use of diagnostic reference levels for the optimization of protection in medical imaging: current status and challenges worldwide. Journal of Medical Imaging, 2017, Vol. 4(3), pp. 031214.
- Toma P. [et. al.] Radiation exposure in diagnostic imaging: wisdom and prudence, but still a lot to understand. Radiol. Med., 2017, Vol. 122, pp.215-220.

**Aleksandr V. Vodovatov**

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

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

11. Frush D.P., Perex M.D.R. Children, medical radiation and the environment: An important dialogue. *Environmental Research*, 2017, Vol. 156, pp. 358-363.
12. Rehani M., Vassileva J. Survey of imaging technology and patient dose recording practice in developing countries. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 2018, Vol. 181(3), pp. 240-245. doi: 10.1093/rpd/ncy019
13. Järvinen H., Vassileva J., Samei E., Wallace A., Vano E., Rehani M. Patient dose monitoring and the use of diagnostic reference levels for the optimization of protection in medical imaging: current status and challenges worldwide. *J Med Imaging*, 2017, Vol. 4(3), pp. 312-314. doi: 10.1117/1.JMI.4.3.031214
14. Results of the 2017 radiation-hygienic passportisation in subjects of the Russian Federation: radiation-hygienic passport of the Russian-Federation. Moscow, Federal service of surveillance on consumer rights protection and human well-being, 2018, 128 p. (In Russian)
15. Balonov M., Golikov V., Zvonova I., Chipiga L., Kalnitsky S., Sarycheva S. and Vodovatov A. Patient doses from medical examinations in Russia: 2009–2015. *J. Radiol. Prot.*, Vol. 38, pp. 121-140. doi:<https://doi.org/10.1088/1361-6498/aa9b99>
16. Balonov M.I., Golikov V.Yu., Zvonova I.A., Kalnitsky S.A., Repin V.S., Sarycheva S.S., Chipiga L.A. Current levels of medical exposure in Russia. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2015, Vol. 8(3), pp. 67-79. (In Russian)
17. Zvonova I.A., Chipiga L.A. Trends on medical exposure and radiation protection in nuclear medicine in Russia. *Proceedings of International Conference on Radiation Protection in Medicine: Achieving Change in Practice*. Vienna, 2017. IAEA, book of contributions, pp. 188 – 192. – Available on: <https://www.iaea.org/sites/default/files/18/02/rpop-session4.pdf> (Accessed: 16.02.2019).
18. Chipiga L.A., Zvonova I.A., Ryzhkova D.V., Menkov M.A., Dolgushin M.B. Levels of patients' exposure and a potential for optimization of the pet diagnostics in the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2017, Vol. 10(4), pp. 31-43. (In Russian) – Available on: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-4-31-43> (Accessed: 16.02.2019).
19. Chipiga L., Vodovatov A., Zvonova I., Bernhardsson C. Assessment of patient doses and possible approaches for implementation of optimization procedures in PET/CT examinations in the Russian Federation. *Proceedings of the 13th international conference on «Medical Physics in the Baltic States»* (Kaunas, 9-11 November 2017), 2017, pp. 36 – 40.
20. Chipiga L.A., Bernhardsson C. Patient doses in Computed Tomography examinations in two regions of the Russian Federation. *Rad. Prot. Dos.*, 2016, Vol. 169(1-4), pp. 240-244.
21. Ternovoy S.K., Sinitsyn V.E. Perspectives of the development of the methods of X-ray diagnostics. *Analytical review*. – Available on: <https://rosnecoweb.ru/library/radiodiagnos-tics/002.php> (Accessed: 06.02.2019) (In Russian)
22. Ternovoy S.K., Sinitsyn V.E. Development of the computed tomography and the progress of X-ray diagnostics. *Radiology-practice*, 2005, Vol. 4, pp. 23-29. (In Russian)
23. Matkevich E.I., Sinitsyn V.E., Zelikman M.I., Kruchinin S.A., Ivanov I.V. Main directions of reducing patient irradiation doses in computed tomography. *REJR*, 2018, Vol. 8 (3), pp. 60-73. DOI:10.21569/2222-7415-2018-8-3-60-73. (In Russian)
24. Breast Tomosynthesis. Considerations for Routine Clinical Use. – Available from: <http://www.wishmd.com/wp-content/uploads/2016/04/tomo-white-paper.pdf> (Accessed: 16.02.2019).
25. ICRP 2015. Radiological Protection in Cone Beam Computed Tomography (CBCT). ICRP Publication 129. *Ann. ICRP* 44(1).
26. Dawood A., Patel S., Brown J. Cone beam CT in dental practice. *Br Dent J.*, 2009, Vol. 207(1), pp. 23-28. doi: 10.1038/sj.bdj.2009.560.
27. De Marneffe M., Milicevic M., Milicevic M. Cone Beam CT. New tool in diagnostic imaging. *Rev Med Liege*, 2017, Vol. 72(10), pp. 457-461.
28. Vetter S.Y., Steffen K., Swartman B. [et. al.] Influence of intraoperative conventional fluoroscopy versus cone beam CT on long-term clinical outcome in isolated displaced talar fractures. *J Orthop Surg Res*, 2019, Vol. 14(1), pp. 8. doi: 10.1186/s13018-018-1043-3.
29. Goo H.W., Goo J.M. Dual-Energy CT: New Horizon in Medical Imaging. *Korean J Radiol*, 2017, Vol. 18(4), pp. 555-569. doi: 10.3348/kjr.2017.18.4.555
30. Xie Z.Y., Chai R.M., Ding G.C., Liu Y., Ren K. T and N Staging of Gastric Cancer Using Dual-Source Computed Tomography. *Gastroenterol Res Pract.*, 2018, Vol. 4, pp. 5015202. doi: 10.1155/2018/5015202
31. Greffier J., Pereira F.R., Viala P., Macri F., Beregi J.P., Larbi A. Interventional spine procedures under CT guidance: How to reduce patient radiation dose without compromising the successful outcome of the procedure? *Phys Med.*, 2017, Vol. 35, pp. 88-96. doi: 10.1016/j.ejmp.2017.02.016
32. Svahn T.M., Houssami N., Sechopoulos I., Mattsson S. Review of radiation dose estimates in digital breast tomosynthesis relative to those in two-view full-field digital mammography. *The BREAST*, 2015, Vol. 24(2), pp. 93–99.
33. Helvie M.A. Digital Mammography Imaging: Breast Tomosynthesis and Advanced Applications. *Radiol Clin North Am.*, 2010, Vol. 48(5), pp. 917–929.
34. Båth M., Svalkvist A., von Wrangel A., Rismyhr-Olsson H., Cederblad A. Effective dose to patients from chest examinations with tomosynthesis. *Radiat Prot Dosimetry*, 2010, Vol. 139(1-3), pp.153-8. doi: 10.1093/rpd/ncq092
35. Murano T. [et. al.] Radiation exposure and risk–benefit analysis in cancer screening using FDG-PET: results of a Japanese nationwide survey. *Ann Nucl Med*, 2011, Vol. 25, pp. 657–666. doi: 10.1007/s12149-011-0511-1
36. Padole A., Ali Khawaja R.D., Karla M., Singh S. CT radiation dose and iterative reconstruction techniques. *American Journal of Roentgenology*, 2015, Vol. 204, pp. 384-392. doi: 10.2214/AJR.14.13241
37. Klink T., Obmann V., Heverhagen J., Stork A., Adam G., Begemann P. Reducing CT radiation dose with iterative reconstruction algorithms: the influence of scan and reconstruction parameters on image quality and CTDIvol. *Eur J Radiol.*, 2014, Vol. 83(9), pp. 1645-54. doi: 10.1016/j.ejrad.2014.05.033
38. Status and perspectives of the development of the nuclear medicine and radiation therapy in Russia considering the international trends (analytical review). – 2008. – Available on: [www.oprf.ru/files/yad\\_medicine.doc](http://www.oprf.ru/files/yad_medicine.doc) Last accessed 16.01.2019. (In Russian) (Accessed: 16.02.2019).
39. Romanova S. Nuclear medicine: current state and trends of development. *Remedium*, 2013, Vol. 6, pp. 8-20. (In Russian)
40. Stasi G.A., Ruoti E.M. Critical Evaluation in the Delivery of the Ultrasound Practice: The Point of View of the Radiologist. *Italian Journal of Medicine*, 2012, Vol. 9(1), pp. 5-10. – Available on: <https://doi.org/10.4081/ijtm.2015.502> (Accessed: 16.02.2019).
41. [On-line resource]: – Available on: <https://www.fda.gov/Radiation-EmittingProducts/RadiationEmittingProductsandProcedures/MedicalImaging/MRI/ucm482765.htm> (Accessed: 16.02.2019).
42. European Commission. Medical Radiation Exposure of the European Population. European Commission. Radiation protection, 2014, № 180, Part ½, 181 p.
43. Hart D., Hillier M.C., Shrimpton P.C. HPA-CRCE-034 – Doses to Patients from Radiographic and Fluoroscopic X-ray Imaging Procedures in the UK – 2010 Review. Health Protection Agency, 2012, 87 p.
44. Onishchenko G.G., Popova A.Yu., Romanovich I.K., Barkovsky A.N., Kormanovskaya T.A., Shevkun I.G. Radiation-hygienic

- passportization and USIDC-information basis for management decision making for radiation safety of the population of the Russian Federation. Report 1. Main achievements and challenges to improve. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2017, Vol.10(3), pp. 7-17. (In Russian): – Available on: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-3-7-17> (Accessed: 16.02.2019).
45. Onishchenko G.G., Popova A.Yu., Romanovich I.K., Barkovsky A.N., Kormanovskaya T.A., Shevkun I.G. Radiation-hygienic passportization and USIDC-information basis for management decision making for radiation safety of the population of the Russian Federation Report 2: Characteristics of the sources and exposure doses of the population of the RF. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2017, Vol.10(3), pp. 18-35. (In Russian): – Available on: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-3-18-35> (Accessed: 16.02.2019).
  46. Vodovatov A.V. Practical implementation of the diagnostic reference levels concept for the common radiographic examinations. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2017, Vol.10(1), pp. 47-55. (In Russian): – Available on: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-1-47-55> (Accessed: 16.02.2019).
  47. Vodovatov A.V., Golikov V.Yu., Kalnitsky S.A., Shatsky I.G., Chipiga L.A. Evaluation of levels of exposure of adult patients from common radiographic examinations in the Russian Federation in 2009–2014. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2017, Vol.10(3), pp. 66-75. (In Russian): – Available on: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-3-66-75> (Accessed 16.02.2019).
  48. Vodovatov A.V., Golikov V.Yu., Kamyshanskaya I.G., Zinkevich K.V., Bernhardsson C. Estimation of the conversion coefficients from dose-area product to effective dose for barium meal examinations for adult patients. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2018;11(1):93-100. (In Russian): – Available on: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-1-93-100> (Accessed: 16.02.2019).
  49. Bontrager K.L., Lampignano J.P. *Textbook of radiographic positioning and related anatomy*. Elsevier Mosby, 2014, 826 p.
  50. *Medical X-ray diagnostics: technical aspects, clinical materials, radiation safety* Ed. by R.V. Stavitsky. Moscow, Norma, 2003, 344 p. (In Russian)
  51. Shmutko B.I., Makarenko S.V. *Standards of diagnostic and treatment of the internal diseases. 3rd ed.* Saint-Petersburg "Elbi-SPb", 2005, 800 p. (In Russian)
  52. Eurostat: your key to the European statistics. – Available on: <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database> (Accessed: 09.02.2019)
  53. Golikov V.Yu., Sarycheva S.S., Balonov M.I., Kalnitsky S.A. Ystimation of patients exposure under intervention radiological examinations. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2009, Vol. 2(3), pp. 26-31. (In Russian)
  54. The Organization for Economic Co-operation and Development. *Health at a Glance 2017: OECD Indicators*. The Organization for Economic Co-operation and Development. OECD Publishing, Paris, 2018, 220 p.
  55. U.S. Preventive Services Task Force. Final recommendation statement: lung cancer: screening. U.S. Preventive Services Task Force. – Available on: [www.uspreventiveservicestaskforce.org/Page/Document/RecommendationStatementFinal/lung-cancer-screening](http://www.uspreventiveservicestaskforce.org/Page/Document/RecommendationStatementFinal/lung-cancer-screening). (Accessed: 06.02.2019)
  56. Iaccarino J.M., Clark J., Bolton R., Kinsinger L., Kelley M., Slatore C.G., Au D.H., Wiener R.S. A National Survey of Pulmonologists' Views on Low-Dose Computed Tomography Screening for Lung Cancer. *Ann. Am. Thorac. Soc.*, 2015, Vol. 12(11), pp. 1667-75.
  57. Marshall H.M., Bowman R.V., Yang I.A., Fong K.M., Berg C.D. Screening for lung cancer with low-dose computed tomography: a review of current status. *Journal of Thoracic Disease*, 2013, Vol. 5, pp. 524-539.
  58. Maryasheva Ju.A., Sinityn V.E., Ternovoy S.K. The role of CT-angiography in the examination of the patients with the suspected coronary arteria disease. *Diagnostic and interventional radiology*, 2010, Vol. 4, № 1, pp. 67-73. (In Russian)
  59. Vanhoenacker P.K., Heijenbrok-Kal M.H., Van Heste R., Decramer I., Van Hoe L.R., Wijnns W., Hunink M.G. Diagnostic performance of multidetector CT angiography for assessment of coronary artery disease: meta-analysis. *Radiology*, 2007, Vol. 244, pp. 419–428.
  60. Moscow lung cancer screening. – Available on: <http://medradiology.moscow/ndkt> (Accessed: 06.02.2019). (In Russian)
  61. Federal service of the governmental statistics. *Demography*. – Available on: [http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat\\_main/rosstat/ru/statistics/population/demography/#](http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/population/demography/#) (Accessed: 06.02.2019). (In Russian)
  62. Vodovatov A.V. Improvement of radiation safety standards. Part 1. Appropriateness of the limitation of the medical exposure of healthy individuals. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2018, Vol.11(3), pp.115-124. (In Russian). – Available on: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-3-115-124> (Accessed: 06.02.2019).
  63. Karostik D.V., Kamyshanskaya I.G., Cheremisin V.M., Drozdov A.A., Vodovatov A.V. Evaluation of low-dose CT implementation for lung cancer screening in a general practice hospital. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 2018, Vol. 967. doi:10.1088/1742-6596/967/1/012006
  64. Mazzone P.J., Silvestri G.A., Patel S., Kanne J.P., Kinsinger L.S., Wiener R.S., Soo Hoo G., Deterbeck F.C. Screening for Lung Cancer: CHEST Guideline and Expert Panel Report. *Chest*, 2018, Vol. 153 (4), pp. 954 – 985.
  65. Kim K.P., Einstein A.J., de Gonzalez A.B. Coronary artery calcification screening: estimated radiation dose and cancer risk. *Archives of internal medicine*, 2009, Vol. 169(13), pp. 1188-1194. doi:10.1001/archinternmed.2009.162.

Received: February 08, 2019

**Gennadiy G. Onischenko** – Doctor of Medical Science, Professor, member of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Anna Yu. Popova** – Doctor of Medical Science, Professor, Head, the Russian Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-being, Moscow, Russia

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

**For correspondence: Aleksandr V. Vodovatov** – Head of Medical Protection Laboratory, Leading Researcher, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Mira str., 8, St. Petersburg, 197101, Russia; E-mail: vodovatofff@gmail.com)

**Nataliya S. Bashketova** – Head of the Directorate of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being in Saint-Petersburg, Saint-Petersburg, Russia

**Olga A. Istorik** – Head of the Directorate of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being in the Leningrad Region, Saint-Petersburg, Russia

**Larisa A. Chipiga** – Researcher, Medical protection laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

**Iliya G. Shatsky** – Researcher, Medical protection laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

**Leonid V. Repin** – Junior Researcher of Information Analytical Center, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

**Artem M. Biblin** – Head of Information Analytical Center, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

**For citation: Onischenko G.G., Popova A.Yu., Romanovich I.K., Vodovatov A.V., Bashketova N.S., Istorik O.A., Chipiga L.A., Shatsky I.G., Repin L.V., Biblin A.M. Modern principles of the radiation protection from sources of ionizing radiation in medicine. Part 1: Trends, structure of x-ray diagnostics and doses from medical exposure. Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene, 2019, Vol. 12, No. 1, pp.6-24. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-6-24**

## Радиоэкологическая оценка сельскохозяйственных земель и продукции юго-западных районов Брянской области, загрязненных радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС

А.В. Панов<sup>1</sup>, П.В. Прудников<sup>2</sup>, И.Е. Титов<sup>1</sup>, В.В. Кречетников<sup>1</sup>, А.Н. Ратников<sup>1</sup>, О.А. Шубина<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Центр химизации и сельскохозяйственной радиологии «Брянский», Брянская область, п. Мичуринский, Россия

*Целью настоящей работы являлся анализ современной радиоэкологической обстановки в сельском хозяйстве пяти юго-западных районов Брянской области, подвергшихся наибольшему радиационному воздействию от аварии на Чернобыльской АЭС. В настоящее время на территории исследуемых районов функционирует 135 агропредприятий, общая площадь сельскохозяйственных угодий в которых составляет 266,2 тыс. га. По состоянию на 2018 г. площадь сельскохозяйственных угодий с плотностью загрязнения <sup>137</sup>Cs выше 37 кБк/м<sup>2</sup> составила 244,8 тыс. га. Площадь пашни, сенокосов и пастбищ, находящихся в зоне с плотностью загрязнения 37–185 кБк/м<sup>2</sup>, включает 135,1 тыс. га, 185–555 кБк/м<sup>2</sup> – 88,3 тыс. га, 555–1480 кБк/м<sup>2</sup> – 19,8 тыс. га. В настоящее время лишь на 21,4 тыс. га (8% сельскохозяйственных угодий рассматриваемых районов) уровни загрязнения <sup>137</sup>Cs не превышают 37 кБк/м<sup>2</sup>, и их можно отнести к категории «чистых». Анализ данных радиационного контроля сельскохозяйственной продукции из хозяйств юго-западных районов Брянской области показал, что доля кормов и продукции растениеводства с превышением нормативов в 2017–2018 гг. варьирует от 4 до 15%. Повышенное содержание <sup>137</sup>Cs в кормах ряда агропредприятий определяет превышение санитарно-гигиенических нормативов в продукции животноводства из этих хозяйств – молоко в 4–8% проб, говядина в 5–8% проб. Выделены хозяйства, расположенные в Красногорском и Новозыбковском районах Брянской области, где существует высокий риск превышения допустимых уровней по содержанию радионуклидов в производимой сельскохозяйственной продукции. Показаны требуемые объемы реабилитационных мероприятий в растениеводстве и животноводстве юго-западных районов Брянской области. Суммарная площадь сельскохозяйственных угодий, на которых сохраняется потребность в проведении коренного улучшения и внесении повышенных доз агроулучшителей для производства соответствующей нормативам продукции растениеводства и кормопроизводства, составляет 75 тыс. га. С целью производства соответствующей санитарно-гигиеническим нормативам продукции животноводства необходимо применение ферроцинсодержащих препаратов в объемах 10,5 т/год. Для наиболее радиоактивно загрязненных сельских территорий показана необходимость разработки индивидуальных программ применения реабилитационных технологий, обеспечивающих безопасность проживания населения и ведения им хозяйственной деятельности.*

**Ключевые слова:** авария на Чернобыльской АЭС, радиоактивное загрязнение, <sup>137</sup>Cs, сельскохозяйственные угодья, сельскохозяйственная продукция, радиоэкологический мониторинг.

### Введение

В результате аварии на Чернобыльской АЭС радиационному воздействию подверглись обширные территории, на которых активно велось сельскохозяйственное производство. В Российской Федерации радиоактивные выпадения, обусловленные аварией на ЧАЭС, были зарегистрированы на территории 21 субъекта. В зону радиоактивного загрязнения попало более 2,3 млн га сельскохозяйственных земель. Наиболее высокие уровни загрязнения <sup>137</sup>Cs зарегистрированы в юго-западных районах Брянской области (Гордеевский, Злынковский,

Клинцовский, Красногорский и Новозыбковский районы). Особенности аварийной ситуации на ЧАЭС и погодные условия в период выпадений радионуклидов привели к неравномерности загрязнения территории, в том числе сельскохозяйственных угодий. В связи с этим была предложена зональная система ведения агропромышленного производства. Было выделено четыре зоны по плотности загрязнения <sup>137</sup>Cs: 37–185 (1–5), 185–555 (5–15), 555–1480 (15–40) и более 1480 (40) кБк/м<sup>2</sup> (Ки/км<sup>2</sup>). В юго-западных районах Брянской области доля земель с плотностью загрязнения 37–185 кБк/м<sup>2</sup> составляла 79,2%, 185–555 кБк/м<sup>2</sup> – 15,8%, 555–1480 кБк/м<sup>2</sup> – 4,3% [1].

**Панов Алексей Валерьевич**

Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии

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

Площадь сельскохозяйственных угодий с плотностью загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  свыше 1480 кБк/м<sup>2</sup> составила 17,1 тыс. га, из них сенокосов и пастбищ – 9,8 тыс. га и пахотных земель – 7,3 тыс. га. Эти территории были выведены из землепользования и переведены в земли запаса [2].

За прошедшие 32 года после аварии на ЧАЭС за счет радиоактивного распада плотности загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  земель уменьшились более чем 2 раза, произошли автореабилитационные процессы (фиксация радионуклидов почвой, их перераспределение в корнеобитаемом слое почв). Значительную роль в улучшении радиационной обстановки сыграли проведенные защитные и реабилитационные мероприятия [3]. После аварии на ЧАЭС выполнен большой объем научных исследований, разработаны концепции радиационной защиты населения и окружающей среды, усовершенствованы системы радиационного контроля и мониторинга, разработаны и внедрены в практику технологии реабилитации радиоактивно загрязненных территорий [4].

Масштабное применение реабилитационных мероприятий, а также снижение уровней загрязнения в результате радиоактивного распада основного дозообразующего радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  привели к существенному улучшению радиационной обстановки на территориях, пострадавших от аварии на ЧАЭС. На настоящем этапе после аварии основной задачей является возвращение территорий и населения к условиям нормальной жизнедеятельности. Для населенных сельских территорий эта задача является наиболее сложной, так как, кроме решения радиологических вопросов, она требует и решения социально-экономических и демографических проблем [5]. Основными критериями возможности использования таких территорий для ведения хозяйственной деятельности являются: дозовые нагрузки на население, плотность загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  территории населенных пунктов, сельскохозяйственных угодий и лесов, а также возможность получения пищевой продукции, соответствующей санитарно-гигиеническим требованиям [6–8]. На всех этапах ликвидации последствий аварии на ЧАЭС реабилитация агроферы являлась одним из ведущих направлений по возвращению пострадавших территорий к условиям нормальной жизнедеятельности, поскольку потребление населением радиоактивно загрязненных сельскохозяйственных продуктов питания – это важный фактор формирования дозы внутреннего облучения человека [4].

**Цель исследования** – анализ современной радиологической обстановки в сельском хозяйстве юго-западных районов Брянской области.

#### **Задачи исследования**

В число задач исследования входили:

- обобщение результатов последнего тура радиационного обследования земель сельскохозяйственного назначения юго-западных районов Брянской области;
- оценка уровней загрязнения радионуклидами продукции растениеводства и животноводства, производящейся в юго-западных районах Брянской области;
- выделение критических хозяйств юго-западных районов Брянской области, где возможно превышение нормативов по содержанию радионуклидов в производимой сельскохозяйственной продукции.

#### **Материалы и методы**

Для оценки современной радиологической обстановки в пяти юго-западных районах Брянской области проведен сбор, обобщение и анализ данных по плотности загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  сельскохозяйственных угодий (пашни, сенокосов и пастбищ), продукции растениеводства, включая основные компоненты рациона продуктивных животных, а также продукции животноводства (молока и говядины), производящихся в хозяйствах этих районов. Для этого использовалась информация, полученная от Центра химизации и сельскохозяйственной радиологии «Брянский» и ветеринарных радиологических лабораторий Россельхознадзора, осуществляющих плановый мониторинг сельскохозяйственной продукции в Гордеевском, Злынковском, Клинцовском, Красногорском и Новозыбковском районах Брянской области. При оценке плотности загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  сельскохозяйственных угодий глубина отбора проб почвы на пашне составляет 20 см, а на лугопастбищных угодьях – 10 см.

В настоящее время на территории 5 наиболее радиоактивно загрязненных районов Брянской области функционирует 135 коллективных сельскохозяйственных предприятия (КСХП) различных форм собственности, общая площадь сельскохозяйственных угодий в которых составляет около 266 тыс. га. По сравнению с 2014 г. [9] количество сельскохозяйственных предприятий увеличилось на 57%, однако это в основном обусловлено перераспределением прав собственности на земельные участки, поскольку площадь вновь введенных за последние 5 лет в оборот сельскохозяйственных земель в среднем по рассматриваемым районам возросла значительно (табл. 1).

В настоящее время в исследуемых районах животноводство ведется на 58 сельскохозяйственных предприятиях (43% от всего числа хозяйств). Общая численность крупного рогатого скота (КРС) на откорме и нагуле в этих хозяйствах составляет 13,5 тыс. голов, причем наибольшее поголовье отмечено в Клинцовском районе (5,5 тыс. голов), а наименьшее – в Злынковском районе (0,7 тыс. голов).

Более чем через 30 лет после аварии на ЧАЭС радиационная ситуация на загрязненных территориях существенно улучшилась. В период 2015–2018 гг. ФГБУ «Брянскагрохимрадиология» провело шестой тур радиологического обследования юго-западных районов Брянской области, который позволил оценить современную радиологическую обстановку на сельскохозяйственных угодьях (табл. 2).

#### **Результаты и обсуждение**

Для абсолютного большинства территорий Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на ЧАЭС, основным дозообразующим радионуклидом являлся  $^{137}\text{Cs}$ . Вклад  $^{90}\text{Sr}$  в дозовую нагрузку на человека в большинстве пострадавших районов не учитывался, поскольку соотношение между активностью этих радионуклидов в почве не превышало 0,02, достигая лишь в отдельных районах 0,1. Максимальные уровни загрязнения территории России  $^{90}\text{Sr}$  чернобыльского происхождения находятся в запад-

Характеристика сельскохозяйственных угодий юго-западных районов Брянской области, наиболее загрязненных <sup>137</sup>Cs вследствие аварии на ЧАЭС

Таблица 1

Characteristics of agricultural lands of the south-west districts of the Bryansk region, the most contaminated by <sup>137</sup>Cs after the Chernobyl accident]

[Table 1

Район [District]	Количество КСХП [Number of collective farms]		Площадь сельскохозяйственных угодий, тыс. га [Area of agricultural lands, thousands hectares]					
			Всего [Total]		Пашня [Arable land]		Сенокосы и пастбища [Hayfields and pastures]	
	2014 г.	2018 г.	2014 г.	2018 г.	2014 г.	2018 г.	2014 г.	2018 г.
Гордеевский [Gordeevsky]	14	23	54,7	54,8	31,6	32,3	23,1	22,2
Злынковский [Zlynkovsky]	11	22	35,0	32,3	26,4	24,8	8,6	7,1
Клинцовский [Klinzovsky]	23	45	60,7	61,3	42,0	41,6	18,7	18,8
Красногорский [Krasnogorsky]	20	21	59,5	57,2	36,3	37,9	23,2	18,9
Новозыбковский [Novozybkovsky]	18	24	52,2	60,6	35,9	40,5	16,3	19,5
Всего [Total]	86	135	262,1	266,2	172,2	177,1	89,9	86,5

Таблица 2

Распределение сельскохозяйственных угодий юго-западных районов Брянской области по плотности загрязнения <sup>137</sup>Cs, кБк/м<sup>2</sup> (данные ФГБУ «Брянскагрохимрадиология»)

[Table 2

Classification of agricultural lands of collective farms of south-west districts of Bryansk region by <sup>137</sup>Cs soil surface activity, kBq/m<sup>2</sup> (the data of radioecological monitoring of "Bryansk agrochemradiology" in 2015–2018)]

Плотность загрязнения <sup>137</sup> Cs, кБк/м <sup>2</sup> [ <sup>137</sup> Cs soil surface activity, kBq/m <sup>2</sup> ]	Сельхозугодий всего [Agricultural lands, Total]		В том числе [Including]							
			Пашня [Arable land]		Сенокос [Hay fields]		Пастбище [Pastures]		Сад [Gardens]	
	га [ha]	%	га [ha]	%	га [ha]	%	га [ha]	%	га [ha]	%
<i>Гордеевский район, 2016 г. [Gordeevsky district, 2016]</i>										
До 37 [below 37]	1059	1,9	931	3,2	47	0,4	81	0,7	–	–
37–185	25622	47,0	18776	58,0	3117	29,3	3702	32,0	27	10,8
185–555	24940	45,3	12433	38,2	5706	53,6	6594	56,9	207	82,8
555–1480	2917	5,3	182	0,6	1708	16,0	1011	8,7	16	6,4
Свыше 1480 [above 1480]	269	0,5	–	–	71	0,7	198	1,7	–	–
Всего: [Total:]	54807	100	32322	100	10649	100	11586	100	250	100
Средневзвешенное, кБк/м <sup>2</sup> [ <sup>137</sup> Cs average, kBq/m <sup>2</sup> ]	255		184		359		348		319	
МЭД ГИ,* мкЗв/час [ADER, μSv/h]	0,23		0,21		0,29		0,28		0,27	
<i>Злынковский район, 2017 г. [Zlynkovsky district, 2017]</i>										
До 37 [below 37]	3965	12,2	3441	13,8	151	5,2	333	7,9	40	12,9

**Research articles**

*Продолжение таблицы 2*

Плотность загрязнения <sup>137</sup> Cs, кБк/м <sup>2</sup> [ <sup>137</sup> Cs soil surface activity, kBq/m <sup>2</sup> ]	Сельхозугодий всего [Agricultural lands, Total]		В том числе [Including]							
			Пашня [Arable land]		Сенокос [Hay fields]		Пастбище [Pastures]		Сад [Gardens]	
	га [ha]	%	га [ha]	%	га [ha]	%	га [ha]	%	га [ha]	%
37–185	16071	49,7	13560	54,5	1108	38,1	1397	33	6	1,9
185–555	9591	29,7	6118	24,6	1167	40,0	2093	49,5	213	68,7
555–1480	2434	7,5	1560	6,3	433	14,9	390	9,2	51	16,5
Свыше 1480 [above 1480]	282	0,9	215	0,8	52	1,8	15	0,4	–	–
Всего: [Summary:]	32343	100	24894	100	2911	100	4228	100	310	100
Средневзвешенное, кБк/м <sup>2</sup> [ <sup>137</sup> Cs average, kBq/m <sup>2</sup> ]	223		201		374		241		339	
МЭД ГИ, мкЗв/час [ADER, μSv/h]	0,21		0,20		0,23		0,24		0,26	
<i>Клинцовский район, 2017 г. [Klinzovsky district, 2017]</i>										
До 37 [below 37]	12159	19,8	8770	21,1	1096	14,9	2239	19,5	54	6,3
37–185	33963	55,4	26670	64,1	2246	30,5	4583	39,8	464	53,6
185–555	13388	21,8	6131	14,7	3165	43,0	3779	32,8	313	36,2
555–1480	1549	2,5	32	0,1	833	11,3	650	5,6	34	3,9
Свыше 1480 [above 1480]	282	0,5	–	–	17	0,3	265	2,3	–	–
Всего: [Total:]	61341	100	41603	100	7357	100	11516	100	865	100
Средневзвешенное, кБк/м <sup>2</sup> [ <sup>137</sup> Cs average, kBq/m <sup>2</sup> ]	152		106		272		239		195	
МЭД ГИ, мкЗв/час [ADER, μSv/h]	0,17		0,15		0,19		0,20		0,20	
<i>Красногорский район, 2015 г. [Krasnogorsky district, 2015]</i>										
До 37 [below 37]	4198	7,3	3456	9,1	296	3,7	446	4,1	–	–
37–185	36288	63,5	25857	68,1	4717	59,1	5522	50,5	192	57
185–555	12608	22	7166	18,9	1887	23,7	3464	31,7	91	27
555–1480	3909	6,8	1464	3,9	1075	13,5	1316	12	54	16
Свыше 1480 [above 1480]	177	0,3	–	–	–	–	177	1,6	–	–
Всего: [Summary:]	57180	100	37943	100	7975	100	10925	100	337	100
Средневзвешенное, кБк/м <sup>2</sup> [ <sup>137</sup> Cs average, kBq/m <sup>2</sup> ]	213		159		325		316		336	
МЭД ГИ, мкЗв/час [ADER, μSv/h]	0,21		0,20		0,25		0,26		0,22	
<i>Новозыбковский район, 2018 г. [Novozybkovsky district, 2018]</i>										
До 37 [below 37]	62	0,1	44	0,2	–	–	18	0,1	–	–
37–185	23179	38,2	20726	51,1	846	9,7	1483	13,7	124	22,9
185–555	27744	45,8	17419	43	4525	51,6	5461	50,5	339	62,5

Плотность загрязнения <sup>137</sup> Cs, кБк/м <sup>2</sup> [ <sup>137</sup> Cs soil surface activity, kBq/m <sup>2</sup> ]	Сельхозугодий всего [Agricultural lands, Total]		В том числе [Including]							
			Пашня [Arable land]		Сенокос [Hay fields]		Пастбище [Pastures]		Сад [Gardens]	
	га [ha]	%	га [ha]	%	га [ha]	%	га [ha]	%	га [ha]	%
555–1480	9027	14,9	2339	5,8	2965	34	3644	33,7	79	14,6
Свыше 1480 [above 1480]	604	1,0	–	–	388	4,4	216	1,9	–	–
Всего: [Total:]	60616	100	40528	100	8724	100	10822	100	542	100
Средневзвешенное, кБк/м <sup>2</sup> [ <sup>137</sup> Cs average, kBq/m <sup>2</sup> ]		388		296		580		570		445
МЭД ГИ, мкЗв/час [ADER, μSv/h]		0,26		0,25		0,32		0,33		0,33

\* МЭД ГИ – мощность амбиентного эквивалента дозы  
\* [ADER – ambient dose equivalent rate].

ной части Брянской области и составляют в настоящее время менее 20 кБк/м<sup>2</sup> [1]. <sup>90</sup>Sr как тугоплавкий изотоп выпал, в основном, в ближней зоне ЧАЭС и представлял опасность для ряда районов Беларуси и Украины. Хотя коэффициенты перехода <sup>90</sup>Sr из всех типов почв в растениеводческую продукцию выше, чем <sup>137</sup>Cs, поступление из рациона животных в животноводческую продукцию для <sup>90</sup>Sr ниже, чем для <sup>137</sup>Cs (для молока в 5–10 раз, а для мяса приблизительно в 100 раз) [10]. Поэтому система защитных и реабилитационных мероприятий в агропромышленном комплексе планировалась, исходя из плотности загрязнения почв <sup>137</sup>Cs. Радиационный контроль за качеством продукции по содержанию <sup>90</sup>Sr проводился НИИРГ в рамках федеральных целевых программ и показал отсутствие превышения допустимых уровней уже в первые годы после аварии. Поэтому полагалось, что все мероприятия, направленные на снижение загрязнения территории <sup>137</sup>Cs, одновременно будут улучшать радиационную обстановку в регионе и в отношении <sup>90</sup>Sr.

По состоянию на 2018 г. площадь сельскохозяйственных угодий юго-западных районов Брянской об-

ласти с плотностью загрязнения <sup>137</sup>Cs свыше 37 кБк/м<sup>2</sup> включала 244,8 тыс. га. Площадь угодий, находящихся в зоне с плотностью загрязнения 37–185 кБк/м<sup>2</sup>, составляет 135,1 тыс. га, 185–555 кБк/м<sup>2</sup> – 88,3 тыс. га, 555–1480 кБк/м<sup>2</sup> – 19,8 тыс. га. Из 266,2 тыс. га сельскохозяйственных угодий рассматриваемых районов в настоящее время лишь на 21,4 тыс. га (8%) уровни загрязнения <sup>137</sup>Cs не превышают 37 кБк/м<sup>2</sup>, и их можно отнести к категории «чистых» (см. табл. 2). Анализ данных по средневзвешенной плотности загрязнения <sup>137</sup>Cs сельскохозяйственных угодий показывает, что наиболее высокие значения этого показателя характерны для Новозыбковского района (388 кБк/м<sup>2</sup>) и в особенности для лугопастбищных угодий (521 кБк/м<sup>2</sup>). В то же время максимальные уровни загрязнения <sup>137</sup>Cs отмечены на отдельных участках Злынковского района, где они достигают уровня 2638 кБк/м<sup>2</sup> (табл. 3).

Анализ данных последнего тура радиологического обследования также показал, что средневзвешенная плотность загрязнения <sup>137</sup>Cs сельскохозяйственных земель в юго-западных районах Брянской области уменьшилась с

Таблица 3  
Поверхностная плотность загрязнения <sup>137</sup>Cs сельскохозяйственных угодий хозяйств юго-западных районов Брянской области, кБк/м<sup>2</sup> (данные VI тура обследования ФГБУ «Брянскагрохимрадиология» в 2015–2018 гг.)

[Table 3  
<sup>137</sup>Cs soil surface activity of agricultural lands of collective farms of south-west districts of Bryansk region, kBq/m<sup>2</sup> (the data of radioecological monitoring of “Bryansk agrochemradiology” in 2015–2018)]

Район [District]	Всего [Total]			Пашня [Arable land]			Сенокосы и пастбища [Hay fields and pastures]		
	Среднее [aver.]	Мин. [min.]	Макс. [max.]	Среднее [aver.]	Мин. [min.]	Макс. [max.]	Среднее [aver.]	Мин. [min.]	Макс. [max.]
Гордеевский [Gordeevsky]	255	15	2375	184	15	817	353	17	2375
Злынковский [Zlynkovsky]	223	7	2638	201	7	2638	293	15	2638
Клинцовский [Klinzovsky]	152	4	2031	106	4	699	241	4	2031

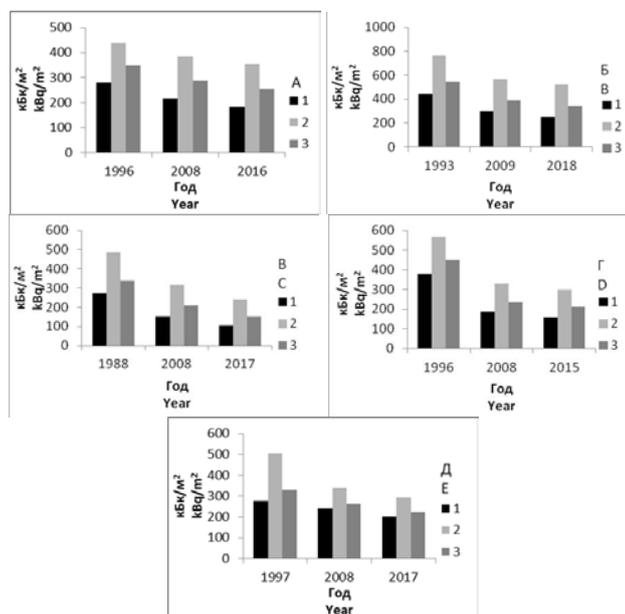
Район [District]	Всего [Total]			Пашня [Arable land]			Сенокосы и пастбища [Hay fields and pastures]		
	Среднее [aver.]	Мин. [min.]	Макс. [max.]	Среднее [aver.]	Мин. [min.]	Макс. [max.]	Среднее [aver.]	Мин. [min.]	Макс. [max.]
Красногорский [Krasnogorsky]	213	5	2532	159	5	1257	300	19	2532
Новозыбковский [Novozybkovsky]	388	37	1785	296	41	1285	521	37	1785

2008 г. в 1,2 раза и составляет 236 кБк/м<sup>2</sup> (в 6,4 раза выше уровня 37 кБк/м<sup>2</sup>). Средневзвешенная плотность загрязнения <sup>137</sup>Cs сельскохозяйственных угодий Гордеевского района с 1996 г. снизилась в 1,4 раза и находится в настоящее время на уровне 255 кБк/м<sup>2</sup>, Новозыбковского района с 1993 г. – в 1,6 раза и составляет 388 кБк/м<sup>2</sup>, Клинцовского района с 1988 г. – в 2,2 раза и находится на уровне 152 кБк/м<sup>2</sup>, Красногорского района с 1996 г. – в 2,1 раза и составляет 213 кБк/м<sup>2</sup> и Злынковского района с 1997 г. – в 1,5 раза и находится на уровне 223 кБк/м<sup>2</sup> (рис.).

В начальный период после аварии на ЧАЭС на значительной территории Брянской области уровни радиоактивного загрязнения оказались настолько высоки, что не позволяли получать продукцию, соответствующую введенным после аварии временно допустимым уровням (ВДУ-86) содержания <sup>137</sup>Cs в сельскохозяйственной продукции. В Гордеевском, Новозыбковском, Красногорском, Клинцовском и Климовском районах доля зерна, молока и кормов, превышающих ВДУ-86, составляла 80% [4]. В последующие годы происходило значительное снижение содержания <sup>137</sup>Cs в сельскохозяйственной продукции, что было

обусловлено, с одной стороны, радиоактивным распадом, фиксацией радионуклида твердой фазой почвы, с другой стороны – применением комплекса защитных и реабилитационных мероприятий. Однако в 5 наиболее радиоактивно загрязненных юго-западных районах Брянской области до настоящего времени не удалось полностью обеспечить производство сельскохозяйственной продукции, соответствующей санитарно-гигиеническим нормативам.

ФГБУ «Брянскагрохимрадиология» и ФГБУ «Брянская межобластная ветеринарная лаборатория» проводят радиационный контроль продукции растениеводства, кормопроизводства и животноводства в коллективных хозяйствах, частном секторе, а также на рынках и предприятиях по переработке сельскохозяйственной продукции. Анализ данных радиационного контроля показывает, что содержание <sup>137</sup>Cs в кормах за последние годы в отдельных пробах превышало нормативы Ветеринарных правил (ВП 13.5.13/06-01) до 27 раз (табл. 4). Доля кормов и продукции растениеводства с превышением нормативов в 2017–2018 гг. варьирует от 4 до 16% (табл. 5).



**Рис.** Динамика изменения средневзвешенных плотностей загрязнения <sup>137</sup>Cs сельскохозяйственных угодий юго-западных районов Брянской области, кБк/м<sup>2</sup> (А – Гордеевский район, Б – Новозыбковский район, В – Клинцовский район, Г – Красногорский район, Д – Злынковский район; 1 – пашня, 2 – сенокосы и пастбища, 3 – всего)

**[Fig.** Dynamics of average contamination density <sup>137</sup>Cs of agricultural lands of collective farms of the south-west districts of the Bryansk region, kBq/m<sup>2</sup>(A – Gordeevsky district, B – Novozybkovsky district, C – Klinzovskiy district, D – Krasnogorsky district, E – Zlynkovskiy district; 1 – arable land, 2 – hay fields and pastures, 3 – average)]

Таблица 4  
Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в продукции растениеводства из хозяйств юго-западных районов Брянской области, Бк/кг  
(по данным ФГБУ «Брянскагрохимрадиология»)

[Table 4  
Content of  $^{137}\text{Cs}$  in plant products from collective farms of the south-west districts of the Bryansk region, Bq/kg  
(the data of "Bryansk agrochemradiology")]

Год [Year]	Зерно [Grain]			Сено [Hay]			Зеленая масса [Green mass]		
	Сред. [aver.]	Мин. [min.]	Макс. [max.]	Сред. [aver.]	Мин. [min.]	Макс. [max.]	Сред. [aver.]	Мин. [min.]	Макс. [max.]
2015	29	2	166	162	3	1502	108	2	2707
2016	28	2	105	143	2	659	67	1	1558
2017	29	2	132	133	2	625	59	2	400
2018	28	2	128	135	2	627	60	2	410
Норматив [Permissible level]	СанПиН* – 60 Бк/кг ВП – 200 Бк/кг [SanPiN – 60 Bq/kg Veterinary Rules – 200 Bq/kg]			ВП – 400 Бк/кг [Veterinary Rules – 400 Bq/kg]			ВП – 100 Бк/кг [Veterinary Rules – 100 Bq/kg]		

\* СанПин 2.3.2.1078-01 с учетом изменения 18 (СанПиН 2.3.2.2650-10)

\* [Sanitary norms and rules 2.3.2.1078-01 considering the adjustment 18]

Таблица 5  
Доля продукции растениеводства из хозяйств юго-западных районов Брянской области, в которых зарегистрировано  
превышение нормативов содержания  $^{137}\text{Cs}$ , % (по данным ФГБУ «Брянскагрохимрадиология»)

[Table 5  
Percentage of plant products with exceeded the standards of content  $^{137}\text{Cs}$  from collective farms of south-west districts  
of Bryansk region, % (the data of "Bryansk agrochemradiology")]

Год [Year]	Зерно продовольственное [Food grain]	Сено [Hay]	Сенаж [Haylage]	Зеленая масса [Green mass]
2015	5	8	7	35
2016	7	4	19	17
2017	8	4	14	16
2018	6	4	15	15

Критической экологической системой в радиоактивно загрязненных ландшафтах юго-западных районов Брянской области остаются лугопастбищные угодья на легких почвах, где наличие луговой дернины, в которой сосредоточена большая часть  $^{137}\text{Cs}$ , обеспечивает интенсивное и длительное поступление радионуклидов в растения. Особенно высокий переход  $^{137}\text{Cs}$  в растительность отмечен на торфяно-болотных почвах. Поэтому основную проблему в настоящее время представляет производство чистых кормов и, соответственно, продукции животноводства. Вследствие высокого содержания  $^{137}\text{Cs}$  в кормах наблюдаются превышения санитарно-гигиенических нормативов по его содержанию (СанПин 2.3.2.1078-01, СанПин 2.3.2.2650-10) в продукции животноводства: молоко и молочная продукция в 4–8% проб, мясо и мясная продукция – в 5–8% проб.

Сравнительный анализ данных радиационного контроля за 2001 и 2005 гг. по содержанию  $^{137}\text{Cs}$  в молоке из коллективных хозяйств пяти юго-западных районов Брянской области с аналогичными данными, полученными в 2013 и 2017 гг., показал, что в 2005 г. во всех рассматриваемых районах наблюдался некоторый рост

доли загрязненного  $^{137}\text{Cs}$  молока (в среднем до 25%), а к 2013 г. (за исключением Гордеевского района) наблюдалось снижение этого показателя за счет более активного применения защитных и реабилитационных мероприятий в рамках выполнения федеральной целевой программы (ФЦП) по преодолению последствий радиационных аварий [11]. В среднем на всей рассматриваемой территории показатели содержания  $^{137}\text{Cs}$  в молоке существенно не изменились, что говорит о достаточно стабильной радиоэкологической ситуации в отдаленный период после аварии (табл. 6).

Анализ данных о содержании  $^{137}\text{Cs}$  в зерне, производящемся в хозяйствах юго-западных районов Брянской области, показал низкие уровни загрязнения данным радионуклидом этого вида продукции на всех типах почв. Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в зерне в среднем по районам заведомо не превышает норматив 60 Бк/кг (СанПин 2.3.2.2650-10). Однако можно выделить хозяйства, в которых в отсутствие реабилитационных мероприятий возможно превышение норматива по содержанию  $^{137}\text{Cs}$  в зерне, выращенном на наиболее радиоактивно загрязненных участках. К таким хозяйствам относятся СПК «Кирова» и

Динамика содержания  $^{137}\text{Cs}$  в молоке из коллективных хозяйств пяти юго-западных районов Брянской области, Бк/л

Таблица 6

[Table 6]

Dynamics of  $^{137}\text{Cs}$  content in milk from collective farms of the south-west districts of the Bryansk region, Bq/l

Район [District]	Год [Year]			
	2001	2005	2013	2017
Гордеевский [Gordeevsky]	47	75	88	68
Злынковский [Zlynkovsky]	35	40	31	34
Клинцовский [Klinzovsky]	52	70	36	60
Красногорский [Krasnogorsky]	50	60	46	52
Новозыбковский [Novozybkovsky]	52	70	37	43
Среднее [Average]	47	63	48	52

СПК «им. 24 съезда» Красногорского района. В этих хозяйствах в отсутствие защитных и реабилитационных мероприятий можно рекомендовать производство зерна на фураж для корма скоту с более «мягким» нормативом по содержанию  $^{137}\text{Cs}$  (200 Бк/кг).

Повышенное содержание  $^{137}\text{Cs}$  в продукции кормопроизводства, в частности в сенаже, возможно в хозяйствах СПК «Кирова» и СПК «им. 24 съезда» Красногорского района, а также в СПК «Решительный», СПК «Красная Ипать», колхозе «Комсомолец» Новозыбковского района. Высокие уровни загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  сена, производимого на торфяно-болотных почвах, в настоящее время отмечают в СПК «Кирова», СПК «Кургановская», СПК «Правда», СПК «Увелье» и СПК «им. 24 съезда» Красногорского района, а также в СПК «Коммунар», СПК «Решительный», СПК «Красная Ипать», ОХ «Волна революции», колхозе «Комсомолец» и филиале ВИУА Новозыбковского района. Загрязненность этих кормов  $^{137}\text{Cs}$  будет обуславливать и более высокое содержание радионуклидов в продукции животноводства (молоко, говядина) в этих хозяйствах.

Высокие коэффициенты перехода радионуклидов из малоплодородных почв (характерных для рассматриваемого региона аварии) в сельскохозяйственные культуры и продукты питания, а также фактически полное прекращение проведения защитных и реабилитационных мероприятий в сельском хозяйстве обуславливают существенный вклад внутреннего облучения в суммарную дозовую нагрузку населения – 62% в Гордеевском, 63% – в Злынковском, 64% – в Клинцовском, 61% – в Красногорском и 66% – в Новозыбковском районах.

### Заключение

Анализ данных радиационного контроля, с одной стороны, показал значительное улучшение радиационной обстановки в юго-западных районах Брянской области. С другой стороны, видно, что до сих пор остаются территории, где производство сельскохозяйственной продукции, соответствующей нормативам, требует проведения

комплексных реабилитационных мероприятий (применение ферроцинсодержащих препаратов для КРС, проведение коренного улучшения лугопастбищных угодий, применение повышенных доз минеральных удобрений на пашне). Суммарная площадь сельскохозяйственных угодий, на которых сохраняется потребность в проведении реабилитационных мероприятий для производства продукции растениеводства, кормопроизводства и животноводства, составляет 75 тыс. га. Для молочных коров и бычков на откорме, выпасающихся на лугопастбищных угодьях с высокими уровнями загрязнения  $^{137}\text{Cs}$ , необходимо применение ферроцинсодержащих препаратов (радиопротекторов) в объемах 10,5 т/год. В целом, для таких сельских территорий необходимы индивидуальные программы применения реабилитационных мероприятий, обеспечивающих безопасность проживания населения и ведения им хозяйственной деятельности. Проведение контрмер должно основываться на принципе оптимизации (т.е. носить адресный характер). Внедрение защитных и реабилитационных мероприятий будет способствовать повышению конкурентоспособности производимой сельхозпродукции и, следовательно, улучшению экономического и социального положения данного региона России.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-516-00006).*

### Литература

1. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия-Беларусь) / под ред. Ю.А. Израэля и И.М. Богдевича. Москва-Минск: Фонд «Инфосфера» – НИА-Природа, 2009. – 140 с.
2. Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий / Под ред. чл.-корр. РАН Н.И. Санжаровой и проф. С.В. Фесенко М.: РАН. – 2018. – 278 с.

3. Алексахин, Р.М. Концепция реабилитации загрязнённых сельскохозяйственных угодий в отдалённый период после аварии на Чернобыльской АЭС / Р.М. Алексахин, С.В. Фесенко, Н.И. Санжарова, Л.Н. Ульяненко, А.С. Филипас, А.В. Панов // Вестник РАСХН. – 2003. – №3. – С. 14–17.
4. 30 лет Чернобыльской аварии. Итоги и перспективы преодоления ее последствий в России 1986–2016. Российский национальный доклад / под общ. ред. В.А. Пучкова, Л.А. Большова. – М., 2016. – 202 с.
5. Санжарова, Н.И. Радиологические аспекты возвращения территорий Российской Федерации, пострадавших в результате аварии на Чернобыльской АЭС, к условиям нормальной жизнедеятельности / Н.И. Санжарова, С.В. Фесенко, И.К. Романович, Т.А. Марченко, А.Н. Раздайводин, А.В. Панов, О.А. Шубина, Н.Н. Исамов, П.В. Прудников, В.И. Радин, Г.Я. Брук // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2016. – Т. 56, № 3. – С. 322-335.
6. Радиационно-гигиенические аспекты преодоления последствий аварии на Чернобыльской АЭС / под ред. академика РАН Г.Г. Онищенко и профессора А.Ю. Поповой. – СПб.: НИИРГ имени проф. П.В. Рамзаева, 2016. – Т. 1. – 448 с.
7. Романович, И.К. Обоснование концепции перехода населенных пунктов, отнесенных в результате аварии на Чернобыльской АЭС к зонам радиоактивного загрязнения, к условиям нормальной жизнедеятельности населения / И.К. Романович, Г.Я. Брук, А.Н. Барковский, А.А. Братилова, А.В. Громов, М.В. Кадука // Радиационная гигиена. – 2016. – Т. 9, № 1. – С. 6–18.
8. Брук, Г.Я. Средние годовые эффективные дозы облучения в 2017 году жителей населенных пунктов Российской Федерации, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС (для целей зонирования населенных пунктов) / Г.Я. Брук, И.К. Романович, А.Б. Базюкин, А.А. Братилова, А.Ю. Власов, А.В. Громов, Т.В. Жеско, М.В. Кадука, О.С. Кравцова, К.А. Сапрыкин, В.С. Степанов, Н.В. Титов, В.А. Яковлев // Радиационная гигиена. – 2017. – Т. 10, № 4. – С. 73-78.
9. Панов, А.В. Современное состояние и прогноз загрязнения <sup>137</sup>Cs сельскохозяйственных угодий Брянской, Калужской, Орловской и Тульской областей, подвергшихся воздействию аварии на Чернобыльской АЭС / А.В. Панов, Н.И. Санжарова, О.А. Шубина, Е.В. Гордиенко, И.Е. Титов // Радиация и риск. – 2017. – Т. 26, № 3. – С. 66-74.
10. Сельскохозяйственная радиоэкология / под ред. Р.М. Алексахина, Н.А. Корнеева. – М.: Экология, 1992. – 400 с.
11. Панов, А.В. Радиологический контроль продукции животноводства и кормопроизводства юго-западных районов Брянской области, подвергшихся воздействию аварии на ЧАЭС / А.В. Панов, Н.Н. Исамов, Н.И. Санжарова, Ю.А. Рыбалко // Российский журнал «Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии». – 2015, – №4(16). – С. 91–99.

Поступила: 07.11.2018 г.

**Панов Алексей Валерьевич** – доктор биологических наук, профессор РАН, заместитель директора Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии. **Адрес для переписки:** 249032, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км; E-mail: riag@mail.ru

**Прудников Петр Витальевич** – доктор сельскохозяйственных наук, директор Центра химизации и сельскохозяйственной радиологии «Брянский», Брянская обл., Брянский р-н., п. Мичуринский, Россия

**Титов Игорь Евгеньевич** – научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

**Кречетников Виктор Владимирович** – младший научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

**Ратников Александр Николаевич** – доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

**Шубина Ольга Андреевна** – кандидат биологических наук, ученый секретарь Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

**Для цитирования:** Панов А.В., Прудников П.В., Титов И.Е., Кречетников В.В., Ратников А.Н., Шубина О.А. Радиоэкологическая оценка сельскохозяйственных земель и продукции юго-западных районов Брянской области, загрязненных радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная гигиена. – 2019. – Т. 12, № 1. – С. 25-35. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-25-35

## Radioecological assessment of the agricultural lands and products in south-west districts of the Bryansk region contaminated by radionuclides as the result of the Chernobyl NPP accident

Aleksey V. Panov <sup>1</sup>, Petr V. Prudnikov <sup>2</sup>, Igor E. Titov <sup>1</sup>, Viktor V. Krechetnikov <sup>1</sup>, Aleksandr N. Ratnikov <sup>1</sup>, Olga A. Shubina <sup>1</sup>

<sup>1</sup>All Russian Institute of radiology and agroecology, Obninsk, Russia

<sup>2</sup>The Center of chemistry and agricultural radiology «Bryansky», Michurinskiy village, Bryansk Region, Russia

*The aim of this study was to analyze the current radioecological situation in agriculture in five south-west districts of the Bryansk region, which were exposed to the most radiation influence due to the accident at the Chernobyl NPP. Currently, there are 135 collective farms in the observed areas. The total area of agricultural lands was 266.2 thousand hectares. The area of agricultural lands with <sup>137</sup>Cs contamination over 37 kBq/m<sup>2</sup> was 244.8 thousand hectares in 2018. The area of arable land, hay fields and pastures located in the zone with a <sup>137</sup>Cs soil surface activity in a range of 37–185 kBq/m<sup>2</sup> is 135.1 thousand hectares, 185–555 kBq/m<sup>2</sup> – 88.3 thousand hectares, 555–1480 kBq/m<sup>2</sup> – 19.8 thousand hectares. At present, only 21.4 thousand hectares (8% of the agricultural lands in the considered areas) don't exceed contamination levels of <sup>137</sup>Cs 37 kBq/m<sup>2</sup>, and they can be classified as “clean territory”. Analysis of the agricultural products radiation monitoring data from the collective farms of the south-west districts of the Bryansk region showed that the part of feed and crop products exceeded the standards varied from 4 to 15% in 2017–2018. The high content of <sup>137</sup>Cs in the feed of several collective farms determined the excess of sanitary and hygienic standards in livestock products from these farms – milk in 4–8% of total samples, beef in 5–8% of total samples. The collective farms located in Krasnogorsky and Novozybkovsky districts of the Bryansk region, with a high risk of exceeding the standards for the content of radionuclides in the agricultural products, was identified. The required volumes of rehabilitation measures in the plant growing and animal husbandry of the south-west districts of the Bryansk region was indicated. It was found that 75 thousand hectares of the total area of agricultural lands need radical improvement and the introduction of higher doses of agromeliorants to produce plant-growing and fodder products corresponding to the legislation standards. To produce milk and beef that comply with sanitary and hygienic standards for livestock products, it is necessary to use ferrocyanide treatment in volumes of 10.5 t/a. It was shown that most radioactively contaminated rural areas need individual programs for the application of rehabilitation technologies. Such programs should provide the population safety and domestic activity.*

**Key words:** Chernobyl NPP accident, radioactive contamination, <sup>137</sup>Cs, farmland, agricultural products, radioecological monitoring.

### References

1. Atlas of modern and forecast aspects of the accident at the Chernobyl NPP in the affected areas of Russia and Belarus (ASPA Russia-Belarus). Ed. by Yu.A. Izrael and I.M. Bogdevich. Moscow-Minsk: Found «Infosfera», NIA-Nature, 2009, 140 p. (In Russian).
2. Radioecological consequences of the accident at the Chernobyl NPP: biological effects, migration, rehabilitation of contaminated areas. Ed. by N.I. Sanzharova and S.V. Fesenko. Moscow, RAS, 2018, 278 p. (In Russian).
3. Aleksakhin R.M., Fesenko S.V., Sanzharova N.I., Ulyanenko L.N., Filipas A.S., Panov A.V. The concept of the remediation of the contaminated farm lands in the long-term period after the Chernobyl NPP accident. Vestnik RASKhN, 2003; 3: 14–17 (In Russian).
4. 30 years of the Chernobyl accident. Results and prospects for overcoming its consequences in Russia 1986–2016. Russian national report. Ed. by V.A. Puchkov and L.A. Bolshov. Moscow, 2016, 202 p. (In Russian).
5. Sanzharova N.I., Fesenko S.V., Romanovich I.K., Marchenko T.A., Razdayodin A.N., Panov A.V., Shubina O.A., Isamov N.N., Prudnikov P.V., Radin V.I., Bruk G.Ya. Radiological aspects of the restoration of the territories of the Russian Federation contaminated after the Chernobyl NPP accident to the normal life activity conditions. Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation biology. Radioecology, 2016; 56: 322–335 (In Russian).
6. Radiation-hygienic aspects of overcoming the consequences of the accident at the Chernobyl NPP. Ed. by G.G. Onishchenko and A.Yu. Popova. St. Petersburg, NIIRG name of prof. P.V. Ramzaev, 2016, Vol. 1, 448 p. (In Russian).
7. Romanovich I.K., Bruk G.Ya., Barkovsky A.N., Bratilova A.A., Gromov A.V., Kaduka M.V. Substantiation of the concept of transfer to conditions of normal population activity of the settlements considered to be zones of radioactive contamination after the Chernobyl NPP accident. Radiatsionnaya gigiena = Radiation Hygiene, 2016; 9: 6–18 (In Russian).
8. Bruk G.Ya., Romanovich I.K., Bazyukin A.B., Bratilova A.A., Vlasov A.Yu., Gromov A.V., Zhesko T.V., Kaduka M.V., Kravtsova O.S., Saprykin K.A., Stepanov V.S., Titov N.V., Yakovlev V.A. The average annual effective doses for the population of the settlements of the Russian federation attributed to zones of radioactive contamination due to the Chernobyl accident (for the zonation purposes). Radiatsionnaya gigiena = Radiation Hygiene, 2017; 10: 73–78 (In Russian).

**Aleksey V. Panov**

All Russian Institute of radiology and agroecology

**Address for correspondence:** Kiev highway, 109 km, Obninsk, Kaluga Region, 249032, Russia; E-mail: riar@mail.ru

9. Panov A.V., Sanzharova N.I., Shubina O.A., Gordienko E.V., Titov I.E. Modern situation and the prognosis of the contamination by  $^{137}\text{Cs}$  of the farm lands of Bryansk, Kaluga, Orel and Tula regions, affected by the Chernobyl NPP accident. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*, 2017; 26: 66-74 (In Russian).
10. Agricultural radioecology. Ed. by R.M. Aleksakhin and N.A. Korneev. Moscow, Ekologiya = Ecology, 1992, 400 p. (In Russian).
11. Panov A.V., Isamov N.N., Sanzharova N.I., Rybalko Yu.A. Radiological control of the animal breeding and forage products of the south-western districts of the Bryansk region, affected by the Chernobyl NPP accident. *Rossiyskiy zhurnal «Problemy veterinarnoy sanitarii, gigieny i ekologii» = Problems of the veterinary sanitary, hygiene and ecology*. 2015; 4(16); 91-99 (In Russian).

Received: November 07, 2018

**For correspondence: Aleksey V. Panov** – Doctor of Biological Sciences, Professor, Russian Academy of Sciences, Deputy Director of All Russian Institute of radiology and agroecology (Kiev highway, 109 km, Obninsk, Kaluga Region, 249032, Russia; E-mail: riar@mail.ru)

**Petr V. Prudnikov** – Doctor of Agricultural Sciences, Director of the Center of chemistry and agricultural radiology «Bryansky», Michurinskiy village, Bryansk Region, Russia

**Igor E. Titov** – Researcher of All Russian Institute of radiology and agroecology, Obninsk, Russia

**Viktor V. Krechetnikov** – Junior Researcher of All Russian Institute of radiology and agroecology, Obninsk, Russia

**Aleksandr N. Ratnikov** – Doctor of Agricultural Sciences, Leading Researcher of All Russian Institute of radiology and agroecology, Obninsk, Russia

**Olga A. Shubina** – Candidate of Biological Sciences, Scientific Secretary of All Russian Institute of radiology and agroecology, Obninsk, Russia

**For citation: Panov A.V., Prudnikov P.V., Titov I.E., Krechetnikov V.V., Ratnikov A.N., Shubina O.A. Radioecological assessment of the agricultural lands and products in south-west districts of the Bryansk region contaminated by radionuclides as the result of the Chernobyl NPP accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2019, Vol. 12, No. 1, pp.25-35. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-25-35**

## Estimation of the air kerma rate from $^{137}\text{Cs}$ and $^{134}\text{Cs}$ deposited on the ground in the Sakhalin region of Russia after the Fukushima accident

Valery P. Ramzaev, Anatoly N. Barkovsky

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

*Previous studies conducted by the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Rosпотребнадзор) in Sakhalin Region, Russia in 2011–2012 have shown that soils on the southern Kuril Islands were contaminated with  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{134}\text{Cs}$  due to the accident at the Fukushima-1 NPP. In this study, we evaluated the air kerma rate from  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{134}\text{Cs}$  using earlier published data on the vertical distribution of Fukushima-derived radiocaesium in the soil at grasslands on the islands of Kunashir, Shikotan and Iturup. The air kerma rate due to gamma-rays from pre-Fukushima  $^{137}\text{Cs}$  was estimated as well. In the period from May 2011 to September 2012, the air kerma rate due to the fresh fallout of radioactive caesium varied from 0.31 to 0.84 nGy h<sup>-1</sup>. On average, the contribution of the radiation from Fukushima-derived  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{137}\text{Cs}$  to the total air kerma rate from radioactive caesium was 35% in the fall of 2011 and 25% in the fall of 2012. The mean normalized kerma rate from Fukushima-derived  $^{137}\text{Cs}$  was estimated at a level of 1.63 nGy h<sup>-1</sup> per kBq m<sup>-2</sup> in mid-May 2011, 1.53 nGy h<sup>-1</sup> per kBq m<sup>-2</sup> in autumn 2011 and 1.45 nGy h<sup>-1</sup> per kBq m<sup>-2</sup> in autumn 2012. The mean normalized air kerma rate from pre-Fukushima  $^{137}\text{Cs}$  at reference undisturbed grasslands was estimated as 0.77 nGy h<sup>-1</sup> per kBq m<sup>-2</sup>. The results of our calculations of the air kerma rate from Fukushima-derived  $^{137}\text{Cs}$  were in good agreement with the forecast of the 2013 UNSCEAR model, which was used to estimate the external doses of the Japanese population after the Fukushima accident. For pre-Fukushima  $^{137}\text{Cs}$ , the UNSCEAR model underestimated the calculated normalized air kerma rates in Sakhalin Region by approximately 40%. Our calculations showed that, overall, the aboveground biomass of herbaceous plants had practically no effect on the air kerma rate from radioactive caesium contained in the soil. The fallout of  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{137}\text{Cs}$  after the accident at the Fukushima-1 NPP did not lead to any significant increase in the gamma dose rate in the air at grasslands on Kuril Islands. In 2019–2020, the contribution of radiocaesium to the total gamma dose rate in air will not exceed 5%.*

**Key words:** the Fukushima accident, global fallout,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , soil, grasslands, air kerma rate, Kuril Islands.

### Оценка мощности воздушной кермы гамма-излучения $^{137}\text{Cs}$ и $^{134}\text{Cs}$ , выпавших на почву в Сахалинской области России после Фукусимской аварии

В.П. Рамзаев, А.Н. Барковский

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

*Предыдущие исследования, проведенные Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор) в Сахалинской области (Россия) в 2011–2012 гг., показали, что почва на южных Курильских островах была загрязнена  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{134}\text{Cs}$  вследствие аварии на АЭС «Фукусима-1». Мы вычислили мощность кермы в воздухе, используя ранее опубликованные данные о вертикальном распределении фукусимского радиоактивного цезия в почве на лугах островов Кунашир, Шикотан и Итуруп. Тем же методом была оценена мощность воздушной кермы от гамма-излучения  $^{137}\text{Cs}$ , содержащимся в почве до фукусимских выпадений. В период с*

**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

мая 2011 г. по сентябрь 2012 г. мощность кермы от новых выпадений радиоактивного цезия варьировала от 0,31 до 0,84 нГр/ч. В среднем вклад излучения фукусимских  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в общую мощность воздушной кермы от радиоактивного цезия составил 35% осенью 2011 г. и 25% осенью 2012 г. Средняя нормализованная мощность кермы от излучения фукусимского  $^{137}\text{Cs}$  составляла 1,63 (нГр/ч)/(кБк/м<sup>2</sup>) в середине мая 2011 г., 1,53 (нГр/ч)/(кБк/м<sup>2</sup>) осенью 2011 г. и 1,45 (нГр/ч)/(кБк/м<sup>2</sup>) осенью 2012 г. Средняя нормализованная мощность кермы излучения дофукусимского  $^{137}\text{Cs}$  на целинных лугах составила 0,77 (нГр/ч)/(кБк/м<sup>2</sup>). Результаты наших расчетов для мощности кермы от фукусимского  $^{137}\text{Cs}$  хорошо соответствовали прогнозу модели НКДАР ООН 2013 г., которая использовалась для оценки доз внешнего облучения населения Японии после Фукусимской аварии. Для дофукусимского  $^{137}\text{Cs}$  модель НКДАР ООН недооценивала расчетную нормализованную мощность кермы в Сахалинской области примерно на 40%. Наши расчеты показали, что надземная биомасса травянистых растений практически не влияла на мощность воздушной кермы гамма-излучения радиоактивного цезия, содержащегося в почве. Выпадения  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  после аварии на АЭС «Фукусима-1» не привели к сколь-либо значимому увеличению мощности дозы гамма-излучения в воздухе над почвой Курильских островов. В 2019–2020 гг. вклад радиоактивного цезия в суммарную мощность дозы гамма-излучения в воздухе не будет превышать 5%.

**Ключевые слова:** Фукусимская авария, глобальные выпадения, почва, луг,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , мощность кермы в воздухе, Курильские острова.

## Introduction

Estimation of gamma-ray dose rate in air at an open undisturbed field (grassland, meadow) is an essential component of a radiological survey after a nuclear accident resulting in a large-scale environmental contamination by gamma-ray emitting radionuclide(s) [1]. The value of gamma dose rate in air at such undisturbed (virgin) lands is often used as a reference parameter in dosimetric models for assessment of the external exposure of the public [2–5].

Since the beginning of the nuclear era (1945), caesium-137 has continued to be a subject of scientific interest and public concern due to its long period of decay ( $T_{1/2} = 30.2$  y) and a relatively high energy of gamma quanta ( $E = 661.6$  keV) emitted by its short-lived ( $T_{1/2} = 2.55$  min) daughter product  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  [6, 7]. During the major nuclear reactor accidents at the Chernobyl and Fukushima-1 NPPs, the release of  $^{137}\text{Cs}$  was accompanied by the release of  $^{134}\text{Cs}$  ( $T_{1/2} = 2.06$  y; the range of the gamma-ray energy,  $E$ , = 242–1365 keV), which contributed significantly to the gamma dose in air and the external gamma radiation dose of the population living in contaminated areas [8, 9].

Studies conducted in different countries after the Chernobyl accident have demonstrated significant spatial and temporal variability in the vertical distribution of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{134}\text{Cs}$  within the soil profile and in the resultant gamma dose rate in air in virgin lands [2, 10–15]. The influencing factors could be the atmospheric conditions (wet or dry fallout), physicochemical forms of fallout, soil properties, activity of soil fauna, and the use of land by man. However, based on numerous empirical data collected after the Chernobyl accident [8], it was possible to develop a general model describing time-dependent evolution of the air kerma rate for undisturbed open lands located at different distances from the Chernobyl NPP [2, 3, 16, 17]. An infinite plane source located below a soil slab of the mass thickness of  $0.5 \text{ g cm}^{-2}$  [3, 11, 16] was selected as the initial distribution of the radionuclides in the ground in the case of wet fallout. For this source, the calculated normalized kerma rate in air is 1.72 and 4.68 nGy h<sup>-1</sup> per kBq m<sup>-2</sup> for  $^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba}$  and  $^{134}\text{Cs}$ , respectively (see Table 1 in [18]). The subsequent time-dependent decrease in the dose rate in air due to the vertical migration of the radionuclides in the soil column (excluding radioactive decay) can be presented by the attenuation function for air kerma rate,  $r(t)$ , [3, 16]:

## Введение

Оценка мощности дозы гамма-излучения в воздухе на открытых целинных участках территории (луг, пастбище) является важным компонентом радиологического обследования после радиационной аварии, сопровождающейся крупномасштабным загрязнением окружающей среды гамма-излучающими радионуклидами [1]. Значение мощности дозы гамма-излучения в воздухе на таких целинных участках часто используется в качестве референтного параметра в дозиметрических моделях для оценки доз внешнего облучения населения [2–5].

С начала ядерной эры (1945 г.) цезий-137 продолжает оставаться предметом научного интереса и беспокойства в обществе из-за его длительного периода распада ( $T_{1/2} = 30,2$  года) и из-за относительно высокой энергии гамма-квантов ( $E = 661,6$  кэВ), испускаемых его короткоживущим ( $T_{1/2} = 2,55$  мин) дочерним продуктом  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  [6, 7]. При ядерных авариях на Чернобыльской и Фукусимской АЭС выброс  $^{137}\text{Cs}$  сопровождался выбросом  $^{134}\text{Cs}$  ( $T_{1/2} = 2,06$  года; диапазон энергий гамма-излучения  $E = 242–1365$  кэВ), который также существенно влиял на мощность дозы гамма-излучения в воздухе и дозу внешнего облучения населения, проживающего на загрязненных территориях [8, 9].

Исследования, проведенные в разных странах после Чернобыльской аварии, продемонстрировали значительную пространственную и временную вариабельность вертикального распределения радиоактивного цезия в профиле почвы и результирующей мощности дозы гамма-излучения в воздухе на целинных участках [2, 10–15]. Влияющими факторами могут быть атмосферные условия во время выпадений (влажные или сухие выпадения), физико-химическая форма выпадений, свойства почвы, активность почвенной фауны и использование земли человеком. Тем не менее, на основе многочисленных эмпирических данных, собранных после Чернобыльской аварии, удалось разработать общую модель, описывающую динамику мощности кермы в воздухе для открытых целинных территорий, расположенных на разных расстояниях от Чернобыльской АЭС [2, 3, 16, 17]. В качестве начального распределения радионуклидов в почве при влажных выпадениях был выбран бесконечный плоский изотропный источник, экранированный слоем почвы толщиной

$$r(t) = p_1 \times \exp\left(-\frac{0.693}{T_1} \times t\right) + p_2 \times \exp\left(-\frac{0.693}{T_2} \times t\right), \quad (1)$$

where  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $T_1$  and  $T_2$  are empirically-derived constants and  $t$  is the time (years) elapsed after the deposition.

For the aerosol form of caesium in fallout in Japan after the accident at the Fukushima-1 NPP, the following parameter values were proposed for Eq. (1):  $p_1 = 0.5$ ,  $p_2 = 0.5$ ,  $T_1 = 1.5$  years, and  $T_2 = 50$  years [8, 18].

The model of the reduction of the gamma dose rate in air due to radiocaesium vertical migration in undisturbed soils has remained unchanged in the UNSCEAR 2016 report [5].

The main objective of this study was to test the applicability of the UNSCEAR model [8, 18] to describe the dynamics of gamma-radiation dose rate in air from the radioactive caesium deposition in virgin soils outside Japan, in the southern part of Sakhalin Region (Russia), after the Fukushima accident. For this purpose, we calculated kerma rates in air using experimental data obtained by Ramzaev et al. [19–21] on the vertical distribution of radiocaesium in grassland soils on the islands of Kunashir, Shikotan and Iturup in 2011 and 2012. The same method was used to estimate the air kerma rate from the  $^{137}\text{Cs}$  deposited in these soils before the Fukushima accident. Finally, we estimated the influence of grassy vegetation cover on the kerma rate in air.

## Materials and methods

### Study area

The surveyed grasslands are located in the southern part of Kunashir Island, on the western and eastern sides of Shikotan Island, and on the eastern side of Iturup Island (see Fig. 1 in [20]) at a distance of 800–1050 km to the north-east from the Fukushima-1 NPP. Geographical coordinates and a brief characteristic of the sites surveyed by three expeditions of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Rosпотребнадзор) on the Kuril Islands in 2011–2012 were provided in [19, 20].

This region has a moderate monsoon climate. In the 2011–2012 period, the average annual temperature for individual islands varied from 5.3 °C to 6.0 °C and the annual precipitation ranged from 1050 mm to 1570 mm. Detailed data on the main climatic characteristics of the region are given in [20]. The meadow-turf soils and black humus soils are common under meadows on the southern Kuril [22].

### Overview of the source data for calculation of air kerma

Radionuclides from Fukushima fallout were first detected on the island of Kunashir at 14–17 March 2011 [23]. Therefore, the 15 March 2011 was selected as a reference date for the onset of the radioactive contamination of the southern Kuril Islands after the Fukushima accident [19, 20].

Soil sampling was conducted [19, 20] during the three time periods: in mid-May 2011 (10 plots), in September–October 2011 (12 plots) and in September 2012 (6 plots). In May 2011, a solid grass-soil block with an area of 20 × 20 cm and a thickness of 4 cm was cut from the wall a hole at each of 10 plots. The block was fractionated into horizontal layers of 0–1 cm (including the covering vegetation), 1–2 cm and 2–4 cm. In September–October 2011 and in September 2012, a 20-cm long dismountable sampler was used to obtain cores from

0.5 г/см<sup>2</sup> [3, 11, 16]. Для такого источника расчетное значение нормализованной мощности кермы в воздухе составляет 1,72 и 4,68 (нГр/ч)/(кБк/м<sup>2</sup>) для  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  и  $^{134}\text{Cs}$  соответственно (см. Таблицу 1 в [18]). Последующее уменьшение мощности дозы в воздухе со временем из-за вертикальной миграции радионуклидов в почве (без учета радиоактивного распада) может быть представлено функцией ослабления мощности кермы в воздухе,  $r(t)$ , [3, 16]:

$$r(t) = p_1 \times \exp\left(-\frac{0.693}{T_1} \times t\right) + p_2 \times \exp\left(-\frac{0.693}{T_2} \times t\right), \quad (1)$$

где  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $T_1$  и  $T_2$  – эмпирически полученные константы, а  $t$  – время (годы), прошедшее после выпадений.

Для аэрозольной формы цезия в выпадениях в Японии после аварии на АЭС «Фукусима-1» были предложены следующие значения параметров в уравнении (1):  $p_1 = 0,5$ ,  $p_2 = 0,5$ ,  $T_1 = 1,5$  года и  $T_2 = 50$  лет [8, 18]. Модель снижения мощности дозы гамма-излучения в воздухе, обусловленного вертикальной миграцией радиоактивного цезия в целинных почвах, осталась неизменной в отчете НКДАР ООН за 2016 год [5].

Основная цель данного исследования состояла в том, чтобы проверить применимость модели НКДАР ООН [8, 18] для описания динамики мощности дозы гамма-излучения в воздухе от выпадений радиоактивного цезия на целинной почве после Фукусимской аварии за пределами территории Японии, в южной части Сахалинской области (Россия). Для этого мы рассчитали мощность кермы в воздухе, используя экспериментальные данные, полученные Ramzaev et al. [19–21] в 2011 и 2012 годах по вертикальному распределению радиоактивного цезия в почвах на лугах островов Кунашир, Шикотан и Итуруп. Тем же методом была оценена мощность воздушной кермы от  $^{137}\text{Cs}$ , накопившегося в этих почвах до Фукусимской аварии. Наконец, мы оценили влияние травяного растительного покрова на мощность кермы в воздухе.

## Материалы и методы

### Область исследования

Обследованные луга расположены в южной части острова Кунашир, на западной и восточной сторонах острова Шикотан, а также на восточной стороне острова Итуруп (см. рисунок 1 в [20]) на расстоянии 800–1050 км к северо-востоку от АЭС «Фукусима-1». Географические координаты и характеристика участков, обследованных тремя экспедициями Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор) на Курильских островах в 2011–2012 гг., приведены в [19, 20].

Данный регион имеет умеренный муссонный климат. В период 2011–2012 гг. среднегодовая температура для отдельных островов колебалась от 5,3 °C до 6,0 °C, а годовое количество осадков – от 1050 мм до 1570 мм. Подробные данные об основных климатических характеристиках региона приведены в [20]. На лугах Южных Курил распространение имеют лугово-дерновые и гумусовые почвы [22].

the topsoil after cutting off the grassy vegetation. Ten cores were collected at each plot. The soil core taken was cut into slices of 1 cm thick for the top 5 cm and of 5 cm thick for a depth of 5–20 cm. Wet and dry mass was determined for each soil sample. Activities of <sup>137</sup>Cs and <sup>134</sup>Cs in the soil samples were determined by gamma-ray spectrometry using high-purity germanium (HPGe) detectors. Activity concentrations of <sup>137</sup>Cs and <sup>134</sup>Cs were also determined in vegetation (mixed grass crop) collected at each plot in autumn 2011 and 2012 [19, 21].

The ratio of 1:1 between activities of <sup>137</sup>Cs and <sup>134</sup>Cs in Fukushima fallout (as of 15 March 2011) was used to calculate the contribution of <sup>137</sup>Cs fallout after the accident at the Fukushima-1 NPP to the total inventory of <sup>137</sup>Cs accumulated as a result of atmospheric nuclear tests (global fallout), the Chernobyl accident (Chernobyl fallout) and the Fukushima accident (Fukushima fallout) [19]. The maximum intensity of global fallout from nuclear weapon tests was observed in 1963 [6].

The term “pre-Fukushima <sup>137</sup>Cs” is used below to refer to <sup>137</sup>Cs accumulated in the environment as a result of global and Chernobyl fallout that preceded the accident at the Fukushima-1 NPP. Chernobyl-derived <sup>137</sup>Cs accounts for approximately 4% of the total activity of pre-Fukushima <sup>137</sup>Cs in the grassland soils in the Sakhalin region [19].

The summary statistics on sampling depth, water content in soil and current (as of the date of sampling) inventory of <sup>137</sup>Cs and <sup>134</sup>Cs in soil are provided in Table 1.

Обзор исходных данных для расчета воздушной кермы

Радионуклиды фукусимских выпадений были впервые зарегистрированы на острове Кунашир 14–17 марта 2011 г. [23]. Поэтому 15 марта 2011 г. было выбрано нами в качестве даты начала радиоактивного загрязнения южных Курильских островов после аварии на АЭС «Фукусима-1» [19, 20].

Отбор проб почвы [19, 20] проводили в течение трех периодов времени: в середине мая 2011 г. (10 участков), в сентябре – октябре 2011 г. (12 участков) и в сентябре 2012 г. (6 участков). В мае 2011 г. на каждом из 10 участков был вырезан травяно-почвенный блок площадью 20×20 см и толщиной 4 см. Блок разделяли на горизонтальные слои 0–1 см (включая покрывающую растительность), 1–2 см и 2–4 см. В сентябре – октябре 2011 г. и в сентябре 2012 г. для отбора кернов из верхнего слоя почвы после срезания травяной растительности использовали разборный пробоотборник длиной 20 см. На каждом участке отбиралось по десять кернов. Извлеченные керны разрезали на слои толщиной 1 см для верхних 5 см и толщиной 5 см для глубины 5–20 см. Для каждого образца почвы определяли влажную и сухую массу. Активность <sup>137</sup>Cs и <sup>134</sup>Cs в пробах почвы определяли гамма-спектрометрическим методом с использованием полупроводниковых детекторов из особо чистого германия (HPGe). Удельные активности <sup>137</sup>Cs и <sup>134</sup>Cs были также измерены в растительности (разнотравье), собранной на каждом участке осенью 2011 и 2012 гг. [19, 21].

Table 1

Sampling depth, moisture content and inventory of radiocaesium for soil samples from grassland plots surveyed on the islands of Kunashir, Shikotan and Iturup in May and September–October 2011, and in September 2012 (derived from [19, 20])

Таблица 1

Глубина пробоотбора, содержание влаги и запас радиоцезия для проб почвы, отобранных на луговых участках островов Кунашир, Шикотан и Итуруп в мае и сентябре – октябре 2011 г. и в сентябре 2012 г. (по данным [19, 20])

Parameter [Параметр]	Sampling depth (g cm <sup>-2</sup> ) [Глубина пробоотбора (г/см <sup>2</sup> )]		Moisture content (%) [Содержание влаги (%)]	Inventory in soil (Bq m <sup>-2</sup> )* [Запас в почве (Бк/м <sup>2</sup> )*]			
	w.w. [в.в.]	d.w. [с.в.]		<sup>134</sup> Cs	<sup>137</sup> Cs		
					Total [Сумма]	Fukushima [Фукусимский]	Pre-Fukushima [Дофукусимский]
May 2011 (n = 10) [Май 2011 г. (n = 10)]							
Minimum [Минимум]	2.02	1.22	40	50.1	126	52.6	55.8
Maximum [Максимум]	7.42	3.82	57	147	1160	155	1090
Median [Медиана]	3.94	2.09	47	67.0	399	70.5	270
Mean [Средняя]	4.25	2.25	47	77.4	453	81.5	371
SD [С.о.]	1.55	0.82	5	28.9	296	30.4	297
September–October 2011 (n = 12) [Сентябрь – октябрь 2011 г. (n = 12)]							
Minimum [Минимум]	20.08	7.20	21	53.0	428	62.8	289
Maximum [Максимум]	31.96	25.31	66	119	3150	141	3050
Median [Медиана]	25.81	14.82	40	86.9	2310	103	2230
Mean [Средняя]	25.91	15.07	43	89.6	2140	106	2040
SD [С.о.]	4.00	5.20	13	19.2	889	22.9	895

Parameter [Параметр]	Sampling depth (g cm <sup>-2</sup> ) [Глубина пробоотбора (г/см <sup>2</sup> )]		Moisture content (%) [Содержание влаги (%)]	Inventory in soil (Bq m <sup>-2</sup> )* [Запас в почве (Бк/м <sup>2</sup> )*]			
	w.w. [в.в.]	d.w. [с.в.]		<sup>134</sup> Cs	<sup>137</sup> Cs		
					Total [Сумма]	Fukushima [Фукусимский]	Pre-Fukushima [Дофукусимский]
September 2012 (n = 6) [сентябрь 2012 г. (n = 6)]							
Minimum [Минимум]	19.20	9.31	29	55.1	1020	89.0	904
Maximum [Максимум]	29.10	20.26	52	69.6	3280	113	3180
Median [Медиана]	24.55	15.30	34	60.3	2570	97.0	2480
Mean [Средняя]	24.39	15.27	38	61.2	2370	98.7	2270
SD [С.о.]	4.16	4.51	10	5.0	889	8.1	896

\* – the inventory of radionuclide in soil is given on the date of sampling;  
w.w. – wet weight;  
d.w. – dry weight;  
n – number of plots sampled;  
SD – standard deviation.  
[ \* – запас радионуклида в почве приведен на дату отбора проб;  
в.в. – влажный вес;  
с.в. – сухой вес;  
n – число опробованных участков;  
С.о. – стандартное отклонение.]

In May 2011, the sampling depth was very shallow and it did not exceed 7.5 g cm<sup>-2</sup> (wet weight, w.w.). However, based on the vertical distributions of <sup>134</sup>Cs given in [19], one might reasonably assume that the upper 4 cm of soil contained almost 100% of the total Fukushima-derived radiocaesium deposit within the ground; 90% of this inventory was contained in the upper 1 cm layer. At the same time, the sampling depth of 4 cm was clearly insufficient for obtaining information on the actual inventory of pre-Fukushima <sup>137</sup>Cs in the areas surveyed in spring 2011 [19].

The average sampling depth in autumn 2011 and 2012 was about 25 g cm<sup>-2</sup> (w.w.), which corresponded to a soil density of approximately 1.25 g cm<sup>-3</sup> (w.w.). This was lower by 22% compared to the value of 1.6 g cm<sup>-2</sup> (w.w.), which was adopted in the 2000 UNSCEAR report [6] as a representative value of soil density *in situ*. The moisture content in the soils from Kuril Islands was rather high: on average about 40%. This value was two times higher than the representative worldwide value of ~19% for soil moisture content [6].

For all plots surveyed in fall 2011–2012, the upper 5-cm layer of soil contained the entire inventory of Fukushima-derived radiocaesium. On average, 87% and 67% of the inventory was associated with the upper 1-cm layer in 2011 and 2012, respectively [19, 20]. Two examples of the vertical distribution of Fukushima-derived <sup>137</sup>Cs in soil sampled in 2011 are presented in Fig. 1.

The sites sampled in the autumn months of 2011–2012 can be divided into two categories based on the vertical distribution and value of pre-Fukushima <sup>137</sup>Cs inventory [19, 20]: 1) uncultivated pastures and virgin lands (reference group) and 2) cultivated pastures and meadows exposed to other anthropogenic and natural factors (non-reference group). Examples of the vertical distribution of pre-Fukushima <sup>137</sup>Cs in soil for the two groups are presented in Fig. 1.

For quantitative comparison of the vertical distributions of pre-Fukushima and Fukushima-derived radiocaesium in soil, the mean migration depth of the radionuclides in soil (for

Соотношение 1:1 между активностями <sup>137</sup>Cs и <sup>134</sup>Cs в фукусимских выпадениях (по состоянию на 15 марта 2011 г.) использовалось для расчета вклада выпадений <sup>137</sup>Cs после аварии на АЭС «Фукусима-1» в общий запас <sup>137</sup>Cs, накопившегося в результате ядерных испытаний в атмосфере (глобальные выпадения), аварии на Чернобыльской АЭС (чернобыльские выпадения) и аварии на АЭС «Фукусима-1» (фукусимские выпадения) [19].

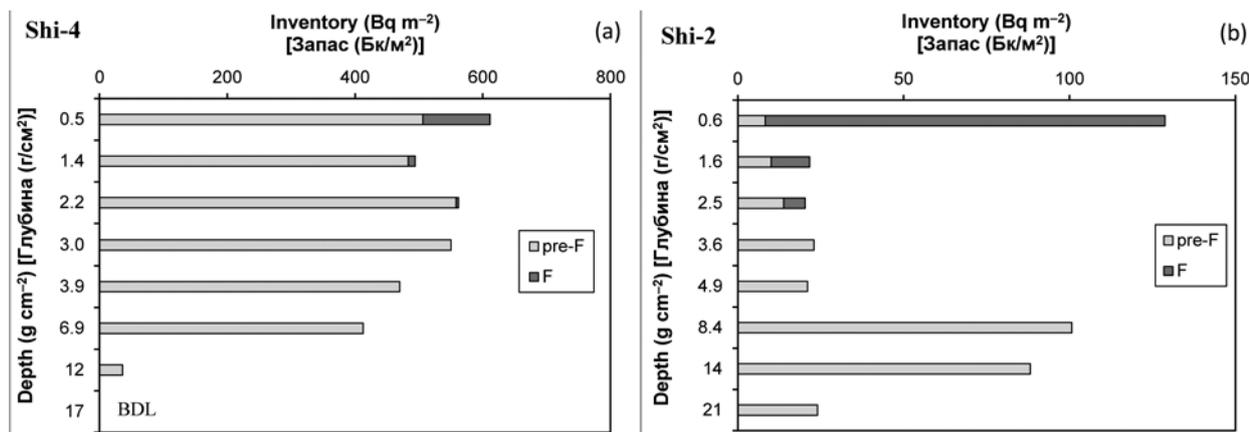
Максимальная интенсивность глобальных выпадений наблюдалась в 1963 г. [6].

Термин «дофукусимский <sup>137</sup>Cs» используется ниже для обозначения <sup>137</sup>Cs, попавшего в окружающую среду в Сахалинской области в результате глобальных и чернобыльских выпадений, предшествовавших аварии на АЭС «Фукусима-1». Доля чернобыльского <sup>137</sup>Cs составляет приблизительно 4% от общей активности дофукусимского <sup>137</sup>Cs в луговых почвах в Сахалинской области [19].

Сводная статистика по глубине отбора проб, содержание воды в почве и текущим (на дату отбора проб) запасам <sup>137</sup>Cs и <sup>134</sup>Cs в почве представлена в таблице 1.

В мае 2011 года глубина отбора проб была очень небольшой и не превышала 7,5 г/см<sup>2</sup> [влажный вес (в.в.)]. Однако, основываясь на вертикальных распределениях <sup>134</sup>Cs, приведенных в [19], можно обоснованно предположить, что верхние 4 см почвы содержали почти 100% от общего запаса фукусимского радиоцезия в грунте; 90% этого запаса содержалось в верхнем 1-см слое. В то же время глубины отбора в 4 см было явно недостаточно для получения информации о фактическом запасе дофукусимского <sup>137</sup>Cs на участках, обследованных весной 2011 г. [19].

Средняя глубина отбора проб осенью 2011 и 2012 гг. составляла около 25 г/см<sup>2</sup> (в.в.), что соответствовало плотности почвы, равной приблизительно 1,25 г/см<sup>3</sup> (в.в.). Это ниже на 22% по сравнению со значением 1,6 г/см<sup>2</sup> (в.в.), которое принято в отчете НКДАР ООН за 2000 г.



**Fig. 1.** Depth distribution of pre-Fukushima <sup>137</sup>Cs (pre-F) and Fukushima-derived <sup>137</sup>Cs (F) in the upper 20 cm layer of soil sampled at reference plot Shi-4 (a) and at non-reference plot Shi-2 (b) on Shikotan Island in October 2011. The total inventories of pre-Fukushima <sup>137</sup>Cs and Fukushima-derived <sup>137</sup>Cs are, respectively: 3020 Bq m<sup>-2</sup> and 120 Bq m<sup>-2</sup> for plot Shi-4, and 289 Bq m<sup>-2</sup> and 139 Bq m<sup>-2</sup> for plot Shi-2. The depth is expressed in the term of mass depth and it is presented on wet (fresh) weight basis. BDL – below detection limit. The figure is constructed based on data from the publication [19]

**[Рис. 1.** Вертикальное распределение дофукусимского <sup>137</sup>Cs (pre-F) и фукусимского <sup>137</sup>Cs (F) в верхнем 20 см слое почвы, отобранной на референтном участке Shi-4 (а) и на нереферентном участке Shi-2 (б) на острове Шикотан в октябре 2011 г. Суммарные запасы дофукусимского <sup>137</sup>Cs и фукусимского <sup>137</sup>Cs составляют 3020 Бк/м<sup>2</sup> и 120 Бк/м<sup>2</sup> на участке Shi-4 и 289 Бк/м<sup>2</sup> and 139 Бк/м<sup>2</sup> на участке Shi-2 соответственно. Глубина выражается в терминах массовой глубины и дается на влажный (свежий) вес. BDL – ниже предела детектирования. Рисунок построен по данным работы [19]

a brief review on this quantity see [15]) was calculated. The mean migration depth of “new” Fukushima-derived <sup>137</sup>Cs was systematically and significantly smaller when compared with that of “aged” pre-Fukushima <sup>137</sup>Cs [20].

#### Calculation of air kerma rate

The detailed data on the vertical distribution of radiocaesium in the grassland soils on Kuril Islands [19, 20] have allowed us to obtain the values of the air kerma using the calculation results [24] for gamma ray dose in the air due to sources in the ground. In accordance with the model described in [24], it was assumed that the radionuclide activity within each layer of soil (and in the aboveground vegetation layer) was presented in the form of a flat infinite isotropic source located in the middle of the layer. A depth of the source is expressed in terms of wet weight, g cm<sup>-2</sup>. To provide data for possible further comparisons with results from other studies, dry mass depth was also taken into consideration.

Calculation of air kerma rate, nGy h<sup>-1</sup>, from Fukushima-derived <sup>137</sup>Cs and pre-Fukushima <sup>137</sup>Cs at a height of 1 m above the ground was carried out for each layer of soil using tabulated transfer coefficients provided in [24]. The coefficients had been calculated by Saito and Jacob [24] for the following composition of soil: SiO<sub>2</sub> – 56%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 16%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 8%, H<sub>2</sub>O – 20%. The air kerma rate from <sup>134</sup>Cs was calculated by multiplication of the air kerma rate from Fukushima-derived <sup>137</sup>Cs by the factor of 2.72 (= 4.68/1.72; see above and in [18]).

Previously, this model of calculation of the air kerma was verified by means of comparison with an alternative calculation method [25] and with the results of direct measurements of the gamma dose rate in air at grasslands in the Bryansk region contaminated with <sup>137</sup>Cs as a result of the Chernobyl accident [13]. In general, the differences between the results obtained by these two methods of calculation were within ±3%.

[6] в качестве репрезентативного глобального значения плотности почвы *in situ*. Содержание влаги в почвах Курильских островов было довольно высоким: в среднем около 40%. Это значение было в два раза больше по сравнению с представительной глобальной величиной ~19% для содержания влаги в почве [6].

На всех участках, обследованных осенью 2011 и 2012 гг., верхний 5-сантиметровый слой почвы содержал весь запас фукусимского радиоцезия. В среднем 87% и 67% запаса было связано с верхним 1-см слоем в 2011 г. и 2012 г. соответственно [19, 20]. Два примера вертикального распределения фукусимского <sup>137</sup>Cs в почве, отобранной в 2011 г., представлены на рисунке 1.

Участки, обследованные в осенние месяцы 2011 и 2012 гг., можно разделить на две категории на основе вертикального распределения и значения запаса дофукусимского <sup>137</sup>Cs [19, 20]: 1) некультивируемые пастбища и целинные земли (референтная группа) и 2) культивируемые пастбища и луга, подверженные воздействию других антропогенных и природных факторов (нереферентная группа). Примеры вертикального распределения дофукусимского <sup>137</sup>Cs в почве для этих двух групп приведены на рисунке 1.

Для количественного сравнения вертикальных распределений дофукусимского и фукусимского радиоцезия в почве была рассчитана средняя глубина миграции радионуклидов в почве (для краткого обзора этой величины см. [15]). Средняя глубина миграции «нового» фукусимского <sup>137</sup>Cs была систематически намного меньше, чем «старого» дофукусимского <sup>137</sup>Cs [20].

#### Вычисление мощности воздушной кермы

Подробные данные о вертикальном распределении радиоактивного цезия в луговых почвах Курильских островов [19, 20] позволили нам получить значения воздушной

The calculated air kerma rates correlated with the measured absorbed dose rates in air very well. For large grassland plots, the measured dose rates were found to be on average 6% less than the calculated kerma rates. The calculation method used in this work is described in more detail in [13, 26].

*Statistical analysis*

Differences between groups were evaluated using the non-parametric Kruskal–Wallis and Mann–Whitney tests. The non-parametric Spearman correlation coefficient,  $R_{sp}$ , was used to evaluate an association between variables.

**Results and discussion**

*Absolute kerma rate in air*

Table 2 provides summary statistics for results of calculation of absolute air kerma rates from radiocaesium, based on the radioactivity inventory and its vertical distribution in wet soil.

кермы, используя результаты расчетов дозы гамма-излучения в воздухе от источника в земле [24]. В соответствии с моделью, изложенной в работе [24], предполагалось, что активность радионуклидов в каждом слое почвы (и в надземном растительном слое) была представлена в виде плоского бесконечного изотропного источника, расположенного в середине слоя. Глубина залегания источника выражена в терминах влажной массы ( $г/см^2$ ). Чтобы предоставить данные для возможных дальнейших сравнений с результатами других исследований, была также учтена глубина в терминах сухой массы ( $г/см^2$ ).

Расчет мощности воздушной кермы (нГр/ч) от дофукусимского и фукусимского  $^{137}Cs$  на высоте 1 м над землей был выполнен для каждого слоя почвы с использованием табличных коэффициентов перехода, вычисленных Saito и Jacob [24] для следующего состава почвы:  $SiO_2$  – 56%,  $Al_2O_3$  – 16%,  $Fe_2O_3$  – 8%,  $H_2O$  – 20%. Мощность воздушной кермы гамма-излучения  $^{134}Cs$  была рассчитана путем умножения мощности воздушной кермы гамма-

Table 2

**Contribution of Fukushima-derived radiocaesium and pre-Fukushima  $^{137}Cs$  to the total air kerma rate due to the radionuclides deposit in soil at grassland plots sampled on Kunashir, Shikotan and Iturup Islands in 2011 and 2012**

[Таблица 2

**Вклад фукусимского радиоцезия и дофукусимского  $^{137}Cs$  в общую мощность воздушной кермы от этих радионуклидов, залегающих в почве луговых участков, опробованных на островах Кунашир, Шикотан и Итуруп в 2011 г. и 2012 г.]**

Parameter [Параметр]	Air kerma rate ( $nGy\ h^{-1}$ ) [Мощность воздушной кермы (нГр/ч)]*				Total [Сумма]	Fukushima contribution (%) [Вклад Фукусимы (%)]
	Fukushima-derived radiocaesium [Фукусимский радиоцезий]			Pre-Fukushima $^{137}Cs$ [Дофукусимский $^{137}Cs$ ]		
	$^{137}Cs$	$^{134}Cs$	$^{134}Cs+^{137}Cs$			
May 2011 (n = 10) [Май 2011 г. (n = 10)]						
Minimum [Минимум]	0.09	0.22	0.31	0.08	0.44	23
Maximum [Максимум]	0.25	0.64	0.87	1.45	1.89	85
Median [Медиана]	0.12	0.32	0.44	0.34	0.90	60
Mean [Средняя]	0.13	0.35	0.48	0.45	0.93	57
SD [C.o.]	0.05	0.13	0.18	0.40	0.43	18
September–October 2011 (n = 12) [Сентябрь – октябрь 2011 г. (n = 12)]						
Minimum [Минимум]	0.11	0.25	0.36	0.16	0.90	14
Maximum [Максимум]	0.22	0.52	0.74	3.33	3.99	82
Median [Медиана]	0.16	0.37	0.54	1.03	1.51	31
Mean [Средняя]	0.17	0.38	0.55	1.40	1.95	35
SD [C.o.]	0.04	0.08	0.12	1.00	1.00	20
September 2012 (n = 6) [Сентябрь 2012 г. (n = 6)]						
Minimum [Минимум]	0.12	0.20	0.31	0.63	0.99	14
Maximum [Максимум]	0.19	0.32	0.50	2.82	3.27	40
Median [Медиана]	0.15	0.25	0.39	1.24	1.56	22

Parameter [Параметр]	Air kerma rate (nGy h <sup>-1</sup> ) [Мощность воздушной кермы (нГр/ч)]*					Fukushima contribution (%) [Вклад Фукусимы (%)]
	Fukushima-derived radiocaesium [Фукусимский радиоцезий]			Pre-Fukushima <sup>137</sup> Cs [Дофукусимский <sup>137</sup> Cs]	Total [Сумма]	
	<sup>137</sup> Cs	<sup>134</sup> Cs	<sup>134</sup> Cs+ <sup>137</sup> Cs			
Mean [Средняя]	0.15	0.25	0.40	1.40	1.80	25
SD [С.о.]	0.03	0.05	0.08	0.80	0.82	11

\* – the kerma rate in air is given for wet weight of soil on the date of sampling;

n – number of plots sampled;

SD – standard deviation.

[\* – мощность воздушной кермы приведена для влажной почвы на дату отбора проб;

n – число опробованных участков;

С.о. – стандартное отклонение.]

The air kerma rate from pre-Fukushima <sup>137</sup>Cs for individual plots ranged widely between 0.1 and 3.3 nGy h<sup>-1</sup>. The lowest values were determined for sites surveyed in May 2011. It can be explained by the fact that the depth of 4 cm for soil samples was not sufficient for assessing the total inventory of pre-Fukushima <sup>137</sup>Cs in soil and the gamma dose rate in air. The highest kerma rates in air were calculated for the virgin grasslands (the reference group) where the upper 20 cm of soil appeared to contain almost 100% of the total <sup>137</sup>Cs inventory.

The kerma rates in air from Fukushima-derived <sup>137</sup>Cs showed a difference with a factor of three between a minimum of 0.09 nGy h<sup>-1</sup> and a maximum of 0.25 nGy h<sup>-1</sup>, which reflected the variability of the radionuclide inventory in soil (a range = 53–155 Bq m<sup>-2</sup>). On average, Fukushima derived <sup>134</sup>Cs+<sup>137</sup>Cs contributed 35% and 25% to the total kerma rate from radiocaesium in autumn 2011 and in autumn 2012, respectively. The average ambient dose equivalent rate (from natural radionuclides, radiocaesium and cosmic radiation) at an open field on Kunashir Island and Shikotan Island in May 2011 was measured as 28 nSv h<sup>-1</sup> and 35 nSv h<sup>-1</sup>, respectively [27]. Hence, radiocaesium contributed less than 10% to the total gamma dose rate in air in 2011–2012.

It is expected that by 2019–2020, the average air kerma rate from radiocaesium present in the environment due to all radioactive fallout will decrease to about 1.3 nGy h<sup>-1</sup> because of the physical decay of <sup>134</sup>Cs and <sup>137</sup>Cs. The contribution of radioactive caesium to the total gamma dose rate in air will not exceed 5%.

#### Normalised air kerma rate from <sup>137</sup>Cs

Normalized air kerma rate from Fukushima-derived <sup>137</sup>Cs showed a time-dependent decreasing trend: 1.66 ± 0.17 nGy h<sup>-1</sup> per kBq m<sup>-2</sup> in spring 2011, 1.56 ± 0.11 nGy h<sup>-1</sup> per kBq m<sup>-2</sup> in autumn 2011, 1.48 ± 0.22 nGy h<sup>-1</sup> per kBq m<sup>-2</sup> in autumn 2012 (Table 3). Mean migration depth of Fukushima-derived <sup>137</sup>Cs had an opposite trend: 0.68 ± 0.26 g cm<sup>-2</sup> in spring 2011, 0.90 ± 0.31 g cm<sup>-2</sup> in autumn 2011, 1.30 ± 0.71 g cm<sup>-2</sup> in autumn 2012. However, the Kruskal–Wallis and Mann–Whitney tests showed that the differences between the results corresponding to the three periods of soil sampling are not statistically significant (P > 0.05), both for kerma rate and mean migration depth. One of the possible reasons could be large variations in values of the parameters between individual plots. For example, the mean migration depth was in the

излучения фукусимского <sup>137</sup>Cs на 2,72 (= 4,68/1,72; см. выше и в [18]).

Ранее данная модель расчета воздушной кермы была проверена путем сравнения с альтернативным методом расчета [25] и с результатами прямых измерений мощности дозы гамма-излучения в воздухе над почвой в Брянской области, загрязненной <sup>137</sup>Cs в результате аварии на Чернобыльской АЭС [13]. В целом, различия между результатами, полученными этими двумя методами расчета, находились в пределах ±3%. Рассчитанные мощности кермы в воздухе очень хорошо коррелировали с измеренными значениями поглощенной дозы в воздухе. Было обнаружено, что для больших луговых участков измеренные значения мощности дозы были в среднем на 6% меньше, чем рассчитанные значения мощности кермы. Более подробно метод расчета, использованный в настоящей работе, описан в [13, 26].

#### Статистический анализ

Различия между группами оценивали с помощью непараметрических критериев Краскела – Уоллиса и Манна – Уитни. Непараметрический коэффициент корреляции Спирмена (R<sub>sp</sub>) был использован для оценки связи между переменными.

### Результаты и обсуждение

#### Абсолютная мощность кермы в воздухе

В таблице 2 приведены сводные статистические данные по результатам расчета абсолютных мощностей воздушной кермы от радиоактивного цезия на основе величин запаса радионуклидов и их вертикального распределения во влажной почве.

Мощность воздушной кермы от дофукусимского <sup>137</sup>Cs для отдельных участков широко варьировала в диапазоне от 0,1 до 3,3 нГр/ч. Самые низкие значения были определены для участков, обследованных в мае 2011 г. Основной причиной этого было то, что глубина 4 см для образцов почвы не является репрезентативной для оценки общего запаса дофукусимского <sup>137</sup>Cs и мощности дозы гамма-излучения в воздухе. Самые высокие значения воздушной кермы были получены для целинных лугов (референтная группа), где верхние 20 см почвы, по-видимому, содержали почти 100% общего запаса <sup>137</sup>Cs.

Table 3

**Mean migration depth of Fukushima-derived  $^{137}\text{Cs}$  in soil and the corresponding normalized (to 1 kBq  $^{137}\text{Cs}$  per 1 m<sup>2</sup> of the soil surface) values of kerma rate (KR) in air at a height of 1 m above the ground for grassland plots sampled on Kunashir, Shikotan and Iturup Islands in 2011 and 2012**

[Таблица 3]

**Средняя глубина миграции фукусимского  $^{137}\text{Cs}$  в почве и соответствующие нормализованные (на 1 кБк  $^{137}\text{Cs}$  на 1 м<sup>2</sup> поверхности почвы) значения мощности кермы (МК) в воздухе на высоте 1 м над землей для луговых участков, опробованных на островах Кунашир, Шикотан и Итуруп в 2011 г. и 2012 г.]**

Parameter [Параметр]	$^{137}\text{Cs}$ mean depth (g cm <sup>-2</sup> ) [Средняя глубина для $^{137}\text{Cs}$ (г/см <sup>2</sup> )]		Normalized KR (nGy h <sup>-1</sup> per kBq m <sup>-2</sup> ) [Нормализованная МК (нГр/ч)/(кБк/м <sup>2</sup> )]	
	w.w. [в.в.]	d.w. [с.в.]	w.w. [в.в.]	d.w. [с.в.]
May 2011 (n = 10) [Май 2011 г. (n = 10)]				
Minimum [Минимум]	0.37	0.15	1.43	1.71
Maximum [Максимум]	1.05	0.54	1.92	2.14
Median [Медиана]	0.68	0.33	1.63	1.90
Mean [Средняя]	0.68	0.34	1.66	1.93
SD [С.о.]	0.26	0.15	0.17	0.17
September–October 2011 (n = 12) [Сентябрь – октябрь 2011 г. (n = 12)]				
Minimum [Минимум]	0.53	0.21	1.33	1.63
Maximum [Максимум]	1.66	0.79	1.74	2.05
Median [Медиана]	0.79	0.36	1.58	1.87
Mean [Средняя]	0.90	0.42	1.56	1.85
SD [С.о.]	0.31	0.18	0.11	0.13
September 2012 (n = 6) [Сентябрь 2012 г. (n = 6)]				
Minimum [Минимум]	0.62	0.31	1.25	1.50
Maximum [Максимум]	1.99	1.10	1.69	1.91
Median [Медиана]	1.28	0.70	1.49	1.72
Mean [Средняя]	1.30	0.69	1.48	1.71
SD [С.о.]	0.71	0.37	0.22	0.19

w.w. – wet weight;  
d.w. – dry weight;  
n – number of plots sampled;  
SD – standard deviation.  
[в.в. – влажный вес;  
с.в. – сухой вес;  
n – число опробованных участков.  
С.о. – стандартное отклонение.]

range of 0.37–1.05 g cm<sup>-2</sup> in May 2011 and in the range of 0.53–1.66 g cm<sup>-2</sup> in September–October 2011. Additionally, it is worth noting that in many cases soil samples were not obtained in the same plots in different time periods. The air kerma rate for dry soils was 15 percent higher than that for the same wet soils with natural water content.

Мощность воздушной кермы от фукусимского  $^{137}\text{Cs}$  продемонстрировала примерно трехкратную разницу между минимумом 0,09 нГр/ч и максимумом 0,25 нГр/ч, что отражало вариабельность запаса радионуклида в почве (диапазон = 53–155 Бк/м<sup>2</sup>). В среднем фукусимские  $^{134}\text{Cs}$ + $^{137}\text{Cs}$  внесли 35% и 25% в общую мощность воз-

Normalized air kerma rates from pre-Fukushima  $^{137}\text{Cs}$  were calculated separately for the reference and non-reference groups. Results of the calculations are provided in Table 4 together with the data on the mean migration depth of the radionuclide in soil. The normalized air kerma rate for the reference group (mean =  $0.79 \pm 0.25 \text{ nGy h}^{-1}$  per  $\text{kBq m}^{-2}$ ) was about 1.5 times higher than that for the non-reference group (mean =  $0.52 \pm 0.16 \text{ nGy h}^{-1}$  per  $1 \text{ kBq m}^{-2}$ ). The reason was a deeper penetration of  $^{137}\text{Cs}$  into the soil at plots from the non-reference group (the mean migration depth =  $12.15 \pm 3.67 \text{ g cm}^{-2}$ ) compared to that at plots from the non-reference group (the mean migration depth =  $7.10 \pm 3.58 \text{ g cm}^{-2}$ ). The Mann-Whitney test showed statistically significant differences between the two groups with respect to mean migration depth and normalized air kerma rate ( $P < 0.01$ ). For dry soils, the normalized air kerma rates were about 30 percent higher compared to those for wet soils.

The normalized kerma rate in air and the mean migration depth of  $^{137}\text{Cs}$  in the grassland soils of Kuril Islands were strongly negatively correlated with each other ( $R_{sp} = -0.995$ ;  $P < 0.01$ ,  $n = 46$ ). This was expected because the values of these quantities were calculated for the same vertical distri-

душной кермы, обусловленную радиоактивным цезием, осенью 2011 г. и осенью 2012 г. соответственно. Средняя мощность амбиентного эквивалента дозы излучения (от естественных радионуклидов, радиоактивного цезия и космического излучения) в мае 2011 г. на открытой местности на островах Кунашир и Шикотан составила 28 нЗв/ч и 35 нЗв/ч соответственно [27]. Таким образом, в 2011–2012 гг. радиоактивный цезий вносил менее 10% в общую мощность дозы гамма-излучения в воздухе.

Ожидается, что к 2019–2020 гг. средняя мощность воздушной кермы от радиоцезия, накопившегося в окружающей среде за счет всех радиоактивных выпадений, снизится до уровня примерно 1,3 нГр/ч из-за физического распада  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Вклад радиоактивного цезия в суммарную мощность дозы гамма-излучения в воздухе не будет превышать 5%.

*Нормализованная мощность воздушной кермы от  $^{137}\text{Cs}$*

Нормализованная мощность воздушной кермы от фукусимского  $^{137}\text{Cs}$  имела тенденцию к снижению со временем:  $1,66 \pm 0,17$  (нГр/ч)/(кБк/м<sup>2</sup>) весной 2011 г.,  $1,56 \pm 0,11$  (нГр/ч)/

Table 4

**Mean migration depth of pre-Fukushima  $^{137}\text{Cs}$  in the top 20 cm of soil and the corresponding normalized (to 1 kBq  $^{137}\text{Cs}$  per 1 m<sup>2</sup> of the soil surface) values of kerma rate (KR) in air at a height of 1 m above the ground at reference plots and at non-reference plots sampled on Kunashir, Shikotan and Iturup Islands in September–October 2011 and in September 2012**

[Таблица 4

**Средняя глубина миграции дофукусимского  $^{137}\text{Cs}$  в верхнем 20 см слое почвы и соответствующие нормализованные (на 1 кБк  $^{137}\text{Cs}$  на 1 м<sup>2</sup> поверхности почвы) значения кермы в воздухе на высоте 1 м над землей для референтных и нереферентных участков, опробованных на островах Кунашир, Шикотан и Итуруп в сентябре – октябре 2011 г. и в сентябре 2012 г.]**

Parameter [Параметр]	$^{137}\text{Cs}$ mean depth ( $\text{g cm}^{-2}$ ) [Средняя глубина для $^{137}\text{Cs}$ ( $\text{г/см}^2$ )]		Normalized KR ( $\text{nGy h}^{-1}$ per $\text{kBq m}^{-2}$ ) [Нормализованная МК (нГр/ч)/(кБк/м <sup>2</sup> )]	
	w.w. [в.в.]	d.w. [с.в.]	w.w. [в.в.]	d.w. [с.в.]
Reference plots (n = 8) [Референтные участки (n = 8)]				
Minimum [Минимум]	2.97	1.04	0.50	0.69
Maximum [Максимум]	12.02	7.23	1.10	1.55
Median [Медиана]	6.19	3.41	0.82	1.08
Mean [Средняя]	7.10	4.03	0.79	1.08
SD [С.о.]	3.58	2.64	0.25	0.35
Non-reference plots (n = 10) [Нереферентные участки (n = 10)]				
Minimum [Минимум]	5.88	2.83	0.38	0.51
Maximum [Максимум]	16.31	11.89	0.82	1.14
Median [Медиана]	13.10	8.03	0.47	0.68
Mean [Средняя]	12.15	7.53	0.52	0.74
SD [С.о.]	3.67	3.04	0.16	0.22

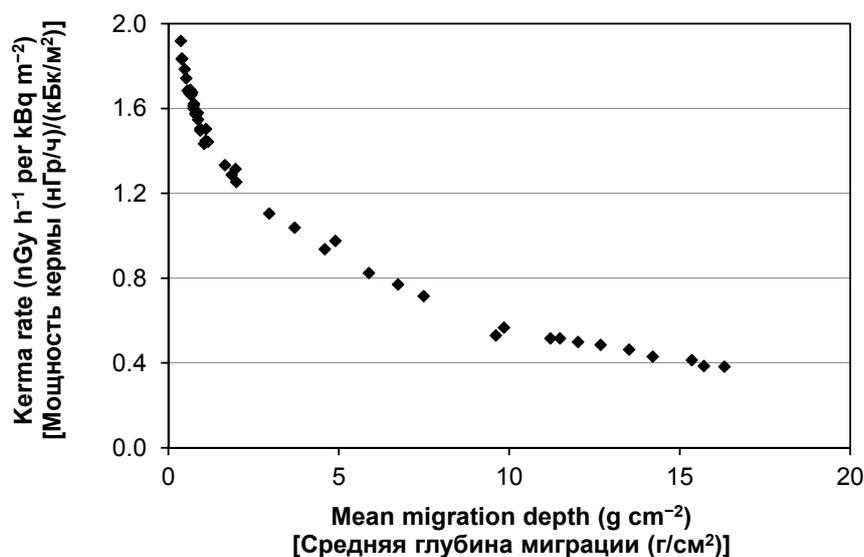
w.w. – wet weight;  
d.w. – dry weight;  
n – number of plots sampled;  
SD – standard deviation.  
[в.в. – влажный вес;  
с.в. – сухой вес;  
n – число опробованных участков;  
С.о. – стандартное отклонение.]

butions of radionuclides in the soil. However, the relationship between the mean migration depth and the air kerma rate cannot be described by a simple linear regression; instead, a more complex (bi-exponential) relationship between these two parameters is apparent (Fig. 2).

Table 5 provides the ratios of the normalized air kerma rate values determined in this study (Tables 3 and 4) to the reference value of air kerma rate ( $1.72 \text{ nGy h}^{-1}$  per  $\text{kBq m}^{-2}$ ) used in the UNSCEAR 2013 model [8]. The ratios calculated with the model [Eq. (1)] for the same time points are also given in Table 5. Our experimental results for Fukushima-derived  $^{137}\text{Cs}$  are highly consistent with the model's predictions, especially for the 0.2 y and 0.55 y time points. For pre-Fukushima  $^{137}\text{Cs}$  (48 y after the peak fallout in 1963; the reference group), the model underestimates normalized kerma rate by approximately 40%. The significant discrepancy between the model prediction and the actual kerma rate in the latter case can be explained by the fact that the UNSCEAR 2013 model [8] is based on experimental data obtained during a relatively short time interval after the Chernobyl accident. Another reason could be differences in the radionuclide deposition modes: a single 'pulse' contamination event in the case of Chernobyl  $^{137}\text{Cs}$  [28] and long-term fallout (from 1945 to ~1990 [6]) in the case of global  $^{137}\text{Cs}$ .

( $\text{kBq/m}^2$  осенью 2011 г.,  $1,48 \pm 0,22$  ( $\text{nГр/ч}$ )/( $\text{kBq/m}^2$ ) осенью 2012 г. (табл. 3). Средняя глубина миграции для  $^{137}\text{Cs}$  демонстрировала противоположную тенденцию:  $0,68 \pm 0,26 \text{ г/см}^2$  весной 2011 г.,  $0,90 \pm 0,31 \text{ г/см}^2$  осенью 2011 г.,  $1,30 \pm 0,71 \text{ г/см}^2$  осенью 2012 г. Тесты Краскела – Уоллиса и Манна – Уитни показали, что различия между результатами, соответствующими трем периодам отбора проб почвы, не являются статистически значимыми ( $P > 0,05$ ) как для мощности кермы, так и для средней глубины миграции. Одной из возможных причин этого могут быть большие различия в значениях параметров между отдельными участками отбора проб. Например, средняя глубина миграции находилась в диапазоне  $0,37\text{--}1,05 \text{ г/см}^2$  в мае 2011 г. и в диапазоне  $0,53\text{--}1,66 \text{ г/см}^2$  в сентябре – октябре 2011 г. Кроме того, стоит отметить, что во многих случаях образцы почвы не были получены на одних и тех же участках в разные периоды времени. Нормализованная мощность воздушной кермы для сухих почв была на 15% выше, чем для тех же влажных почв с естественным содержанием воды.

Нормализованная мощность воздушной кермы от дофукусимского  $^{137}\text{Cs}$  была рассчитана отдельно для референтной и нереферентной групп. Результаты расчетов представлены в таблице 4 вместе с данными



**Fig. 2.** Relationship between the mean migration depth for  $^{137}\text{Cs}$  in soil and the corresponding normalized (to  $1 \text{ kBq } ^{137}\text{Cs}$  per  $1 \text{ m}^2$  of the soil surface) kerma rate in air at 1 m above the ground at grasslands sampled on Kunashir, Shikotan and Iturup Islands in 2011 and 2012. The scatter plot is constructed based on the vertical distributions of Fukushima-derived  $^{137}\text{Cs}$  ( $n = 28$ ) and pre-Fukushima  $^{137}\text{Cs}$  ( $n = 18$ ) in the soil  
**[Рис. 2.** Соотношение между средней глубиной миграции  $^{137}\text{Cs}$  в почве и соответствующим нормализованным (на  $1 \text{ kBq } ^{137}\text{Cs}$  на  $1 \text{ m}^2$  поверхности почвы) значением мощности кермы в воздухе на высоте 1 м над землей для лугов, обследованных на островах Кунашир, Шикотан и Итуруп в 2011 г. и 2012 г. Рисунок построен, основываясь на вертикальных распределениях фукусимского  $^{137}\text{Cs}$  ( $n = 28$ ) и дофукусимского  $^{137}\text{Cs}$  ( $n = 18$ ) в почве]

Table 5

**Kerma rates in air from radiocaesium in soil at undisturbed open grasslands relative to that from an infinite plane source of radiocaesium located below a soil slab of the mass thickness of 0.5 g cm<sup>-2</sup> (the reference distribution of the radioactivity)**

[Таблица 5

**Мощность кермы в воздухе от радиоцезия в почве на целинных лугах по отношению к таковой от бесконечного плоского источника радиоцезия, расположенного под слоем почвы толщиной 0,5 г/см<sup>2</sup> (референтное распределение радиоактивности)]**

Time after deposition (y) [Время после выпадений (год)]	Relative value of air kerma [Относительное значение воздушной кермы]		
	Sakhalin Region (Russia) [Сахалинская область (Россия)]		The UNSCEAR model [8, 18]** [Модель НКДАР ООН [8, 18] ]**
	20% water content in soil* [20% содержание воды в почве*]	40% water content in soil [40% содержание воды в почве]	
0.2	0.97 ± 0.10	0.95 ± 0.10	0.95
0.55	0.91 ± 0.07	0.89 ± 0.07	0.88
1.55	0.86 ± 0.13	0.84 ± 0.13	0.73
48	0.46 ± 0.15	0.45 ± 0.15	0.26

\* – the relative values of air kerma for the time points of 0.2, 0.55 and 1.55 y after deposition have been calculated for Fukushima-derived <sup>137</sup>Cs in wet soil using data in column 4 in Table 3, and for pre-Fukushima <sup>137</sup>Cs (48 y) using data in column 4 in Table 4. The reference normalized value of kerma rate in air at a height of 1 m above the ground is 1.72 nGy h<sup>-1</sup> per 1 kBq m<sup>-2</sup> for an isotropic plane source of <sup>137</sup>Cs located below a soil slab with a mass depth of 0.5 g cm<sup>-2</sup> [18].

\*\* – the relative values of air kerma have been calculated using Eq. (1) and numeric values given in [18], see text.

[\* – относительные значения воздушной кермы для временных точек 0,2, 0,55 и 1,55 года после выпадений были рассчитаны для фукусимского <sup>137</sup>Cs, основываясь на данных в колонке 4 таблицы 3, и для дофукусимского <sup>137</sup>Cs (48 лет) на основе данных, представленных в колонке 4 таблицы 4. Референтное нормализованное значение воздушной кермы на высоте 1 м над землей равно 1,72 (нГр/ч)/(кБк/м<sup>2</sup>) для изотропного плоского источника <sup>137</sup>Cs, расположенного под слоем почвы толщиной 0,5 г/см<sup>2</sup> [18].

\*\* – относительные значения воздушной кермы были рассчитаны с использованием уравнения (1) и численных значений, приведенных в [18], см. текст.]

The soil-to-air conversion coefficients for air kerma rate were calculated by Saito and Jacob [24] for the 20% content of moisture in soil. The average water content in soils from Kuril Islands exceeds the reference value by a factor of 2 (Table 1). In this case, our calculations slightly overestimate (by ~2%) actual air kerma rates for the wet soils (Tables 2–4) because water attenuates gamma radiation 1.11 times more effectively compared to dry soil [29].

Assuming that the water content in the soils is equal to 40%, the mean normalized kerma rate from Fukushima-derived <sup>137</sup>Cs can be estimated at a level of 1.63 nGy h<sup>-1</sup> per kBq m<sup>-2</sup> in spring 2011, 1.53 nGy h<sup>-1</sup> per kBq m<sup>-2</sup> in autumn 2011 and 1.45 nGy h<sup>-1</sup> per kBq m<sup>-2</sup> in autumn 2012. The air kerma rate from pre-Fukushima <sup>137</sup>Cs at the reference sites can be calculated as 0.77 nGy h<sup>-1</sup> per kBq m<sup>-2</sup>. Hence, the mean relative values of air kerma rate (column 2 in Table 5) should be also corrected (column 3 in Table 5). The correction for the water content improves the consistency between the predictions of the 2013 UNSCEAR model [8] and the normalized kerma rates calculated for the grassland soils on Kuril Islands.

*Influence of the aboveground vegetation biomass on air kerma rate*

The presence of radiocaesium in the vegetation cover of the grasslands on Kuril Islands [19, 21], which was not considered in the above calculations for the autumn period 2011–2012, could make a definite contribution to the gamma dose rate in air. At the same time, the aboveground biomass, as such, can absorb and scatter gamma radiation coming from the soil. In order to determine the net effect of these opposite influences, we calculated air kerma rate for the case of the presence of the radioactively contaminated plant biomass

о средней глубине миграции радионуклида в почве. Нормализованная мощность воздушной кермы для референтной группы [среднее значение = 0,79 ± 0,25 (нГр/ч)/(кБк/м<sup>2</sup>)] была примерно в 1,5 раза выше, чем для нереперентной группы [среднее значение = 0,52 ± 0,16 (нГр/ч)/(кБк/м<sup>2</sup>)]. Причиной этого было более глубокое проникновение <sup>137</sup>Cs в почву на участках из нереперентной группы (средняя глубина миграции = 12,15 ± 3,67 г/см<sup>2</sup>) по сравнению с таковым на участках из референтной группы (средняя глубина миграции = 7,10 ± 3,58 г/см<sup>2</sup>). Различия между двумя группами по средней глубине миграции и нормализованной мощности воздушной кермы были статистически значимыми (тест Манна–Уитни, P < 0,01). Для сухих почв нормализованные значения мощности воздушной кермы были примерно на 30% выше, чем для влажных почв.

Нормализованная мощность воздушной кермы сильно отрицательно коррелировала со средней глубиной миграции <sup>137</sup>Cs в почве на лугах Курильских островов (R<sub>sp</sub> = -0,995; P < 0,01, n = 46). Это ожидалось потому, что значения этих величин были рассчитаны для одних и тех же вертикальных распределений радионуклидов в почве. Тем не менее, связь между средней глубиной миграции и нормализованной мощностью воздушной кермы не может быть описана простой линейной регрессией; вместо этого очевидна более сложная (би-экспоненциальная) зависимость между этими двумя параметрами (рис. 2).

В таблице 5 приведены отношения нормализованных значений мощности воздушной кермы, определенных в данном исследовании (см. табл. 3 и 4), к референтному значению мощности воздушной кермы [1,72 (нГр/ч)/(кБк/м<sup>2</sup>)], используемому в модели НКДАР ООН [8]. Отношения, рассчитанные с помощью модели [уравне-

above the soil surface. We used experimental data on the activity concentration of radionuclides in the herbaceous plants which were collected at each of the surveyed plots [19, 21]. The calculations were performed for the biomass density in the range from 0.5 to 2.0 kg m<sup>-2</sup> (0.05–0.2 g cm<sup>-2</sup>, w.w.). This range generally corresponds to variations in the biomass density between individual sites [19, 21]. The results are provided in Table 6 as the ratio of kerma rates for the pair: (bare soil)/(soil with biomass). Despite the presence of pre-Fukushima <sup>137</sup>Cs in the plants, the terrestrial biomass slightly attenuated the kerma rate in air: by about 1% for the vegetation density of 1 kg m<sup>-2</sup>. For gamma radiation from Fukushima-derived <sup>137</sup>Cs, the total effect was on average close to zero in autumn 2011. In autumn 2012, after a significant decrease of the transfer of Fukushima-derived radiocaesium from soil to plants [21], the aboveground plant biomass in all cases attenuated (by 1–7%) gamma radiation from Fukushima-derived radiocaesium accumulated in the soil.

### Conclusions

1. We have calculated kerma rates in air using experimental data obtained by Ramzaev et al. [19–21] on the vertical distribution of radiocaesium in the soil in grasslands on the islands of Kunashir, Shikotan and Iturup in 2011 and 2012. In the period from May 2011 to September 2012, the air kerma rate due to fresh fallout of radioactive caesium from the Fukushima accident varied from 0.31 to 0.84 nGy h<sup>-1</sup>. The fallout of <sup>134</sup>Cs and <sup>137</sup>Cs did not lead to a significant increase in gamma dose rate in air on the meadows of Kuril Islands.

ние (1)] для тех же временных точек, также приведены в таблице 5. Наши экспериментальные результаты для фукусимского <sup>137</sup>Cs хорошо согласуются с предсказаниями модели, особенно для временных точек 0,2 г. и 0,55 г. Для дофукусимского <sup>137</sup>Cs (48 лет после пиковых выпадений в 1963 г.; референтная группа) модель недооценивает нормализованный уровень кермы примерно на 40%. Значительное расхождение между прогнозом по модели и фактической мощностью кермы в последнем случае может быть объяснено тем фактом, что модель НКДАР ООН [8] основана на экспериментальных данных, полученных в течение относительно короткого интервала времени после Чернобыльской аварии. Другой причиной могут быть различия в режимах выпадений радионуклидов: единичное «импульсное» загрязнение в случае чернобыльского <sup>137</sup>Cs [28] и долговременные выпадения с меняющейся интенсивностью (с 1945 по 1990 г. [6]) в случае глобального <sup>137</sup>Cs.

Saito и Jacob [24] вычислили коэффициенты перехода от загрязнения почвы к мощности воздушной кермы для 20% содержания влаги в почве. Среднее содержание воды в почвах Курильских островов превышает это референтное значение в 2 раза (см. табл. 1). В этом случае наши расчеты слегка переоценивают (на ~2%) фактическую мощность воздушной кермы для влажных почв (см. табл. 2–4), поскольку вода ослабляет гамма-излучение в 1,11 раза более эффективно по сравнению с сухой почвой [29].

Предполагая, что содержание воды в почве было равно 40%, среднюю нормализованную мощность воз-

**Air kerma rate attenuation by the aboveground vegetation (mixed grass crop). The estimations are valid for specific conditions of radioactive contamination of grassland plots sampled on Kunashir, Shikotan and Iturup Islands in 2011 and 2012 [19–21]. For the calculations, activity concentrations of radionuclides in wet (fresh) samples of the vegetation and soil were considered**

Table 6

[Таблица 6

**Ослабление мощности воздушной кермы биомассой (травяные растения), расположенной над поверхностью земли. Оценки получены для специфических условий радиоактивного загрязнения луговых площадок, обследованных на островах Кунашир, Шикотан и Итуруп в 2011 г. и 2012 г. [19–21]. Расчеты проведены для влажного (свежего) веса проб растительности и почвы]**

Mass of vegetation per unit area of the ground (kg m <sup>-2</sup> ) [Масса растительности на единицу поверхности земли (кг/м <sup>2</sup> )]	Ratio of kerma rates: (bare ground)/(ground with biomass) [Отношение мощностей кермы: (голая почва)/(почва с биомассой)]							
	Pre-Fukushima <sup>137</sup> Cs [Дофукусимский <sup>137</sup> Cs]				Fukushima <sup>137</sup> Cs [Фукусимский <sup>137</sup> Cs]			
	Mean [Средняя]	S.d. [C.o.]	Minimum [Минимум]	Maximum [Максимум]	Mean [Средняя]	S.d. [C.o.]	Minimum [Минимум]	Maximum [Максимум]
September–October 2011 (n = 12) [Сентябрь – октябрь 2011 г. (n = 12)]								
0.5	1.007	0.004	0.999	1.014	1.001	0.016	0.958	1.016
1.0	1.013	0.006	0.998	1.020	1.001	0.032	0.921	1.032
1.5	1.019	0.008	0.997	1.030	1.002	0.047	0.888	1.047
2.0	1.026	0.011	0.996	1.039	1.003	0.061	0.860	1.063
September 2012 (n = 6) [Сентябрь 2012 г. (n = 6)]								
0.5	1.005	0.003	1.000	1.009	1.013	0.005	1.006	1.018
1.0	1.010	0.006	1.001	1.018	1.025	0.009	1.012	1.036
1.5	1.015	0.008	1.001	1.027	1.037	0.013	1.018	1.054
2.0	1.029	0.010	1.021	1.036	1.069	0.003	1.066	1.071

S.d. – standard deviation.

[C.o. – стандартное отклонение.]

2. The normalized air kerma rate from Fukushima-derived  $^{137}\text{Cs}$  demonstrated a time-dependent decreasing trend: 1.63 nGy h<sup>-1</sup> per kBq m<sup>-2</sup> in spring 2011, 1.53 nGy h<sup>-1</sup> per kBq m<sup>-2</sup> in autumn 2011, 1.45 nGy h<sup>-1</sup> per kBq m<sup>-2</sup> in autumn 2012. However, this trend was not statistically significant.

3. The normalized air kerma rate from pre-Fukushima  $^{137}\text{Cs}$  on uncultivated pastures and virgin lands (a mean = 0.77 nGy h<sup>-1</sup> per kBq m<sup>-2</sup>) was about 1.5 times higher than that on cultivated pastures and lands disturbed by other anthropogenic and natural factors.

4. Results of our calculations for the air kerma rate from Fukushima-derived  $^{137}\text{Cs}$  are consistent with the predictions of the 2013 UNSCEAR model [8, 18] which has been used for evaluation of doses from external radiation to the population of Japan after the Fukushima accident. For pre-Fukushima  $^{137}\text{Cs}$ , this model underestimates the calculated normalized air kerma rate by approximately 40%.

5. The aboveground biomass of herbaceous plants had practically no effect on the air kerma rate from radioactive caesium contained in the grassland soils.

душной кермы от фукусимского  $^{137}\text{Cs}$  следует оценить на уровне 1,63 (нГр/ч)/(кБк/м<sup>2</sup>) весной 2011 г., 1,53 (нГр/ч)/(кБк/м<sup>2</sup>) осенью 2011 г. и 1,45 (нГр/ч)/(кБк/м<sup>2</sup>) осенью 2012 г. Нормализованная мощность воздушной кермы от дофукусимского  $^{137}\text{Cs}$  на референтных лугах оценивается величиной 0,77 (нГр/ч)/(кБк/м<sup>2</sup>). Следовательно, средние относительные значения воздушной кермы (столбец 2 в таблице 5) также должны быть скорректированы (столбец 3 в таблице 5). Поправка на содержание воды улучшает согласованность между нормализованными значениями кермы, рассчитанными для луговых почв Курильских островов, и прогнозами модели НКДАР ООН [8].

*Влияние надземной растительной биомассы на мощность воздушной кермы*

Наличие радиоактивного цезия в растительном покрове лугов на Курильских островах [19, 21], которое не было учтено в приведенных выше расчетах для осеннего периода 2011–2012 гг., могло дать определенный вклад в мощность дозы гамма-излучения в воздухе. В то же время надземная биомасса как таковая должна поглощать и рассеивать гамма-излучение, идущее от почвы. Чтобы определить суммарный эффект этих противоположных воздействий, мы рассчитали мощность кермы для случая присутствия радиоактивно загрязненной биомассы растений над поверхностью почвы. В расчетах использовали экспериментальные данные по удельной активности радионуклидов в травянистых растениях, которые были собраны на каждом из обследованных участков [19, 21]. Расчеты проводили для плотности биомассы в диапазоне от 0,5 до 2,0 кг/м<sup>2</sup> (0,05–0,2 г/см<sup>2</sup>, в.в.). Этот диапазон в целом соответствует колебаниям плотности биомассы между отдельными участками [19, 21]. Результаты представлены в таблице 6 как отношение мощностей кермы для пары: голая почва/почва с биомассой. Несмотря на присутствие дофукусимского  $^{137}\text{Cs}$  в растениях, надземная биомасса немного ослабляла мощность кермы в воздухе: примерно на 1% при плотности растительности 1 кг/м<sup>2</sup>. Для гамма-излучения от фукусимского  $^{137}\text{Cs}$  общий эффект был в среднем близок к нулю осенью 2011 г. Осенью 2012 г. после значительного уменьшения переноса фукусимского радиоцезия из почвы в растения [21] присутствие надземной биомассы во всех случаях ослабляло (на 1–7%) гамма-излучение от радиоцезия, накопившегося в почве.

**Выводы**

1. Мы рассчитали мощность кермы в воздухе, используя экспериментальные данные, полученные Ramzaev et al. [19–21] в 2011 и 2012 гг. по вертикальному распределению радиоактивного цезия в почве на лугах островов Кунашир, Шикотан и Итуруп. В период с мая 2011 г. по сентябрь 2012 г. мощность воздушной кермы, связанной с новыми выпадениями радиоактивного цезия после аварии на АЭС «Фукусима-1», варьировала от 0,31 до 0,84 нГр/ч. Выпадения  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  не привели к сколько-либо значимому увеличению мощности дозы гамма-излучения в воздухе на лугах Курильских островов.

2. Нормализованная мощность воздушной кермы от фукусимского  $^{137}\text{Cs}$  имела тенденцию к снижению со временем: 1,63 (нГр/ч)/(кБк/м<sup>2</sup>) весной 2011 г., 1,53 (нГр/ч)/(кБк/м<sup>2</sup>) осенью 2011 года, 1,45 (нГр/ч)/(кБк/м<sup>2</sup>) осенью 2012 г. Однако эта тенденция была статистически незначимой.

3. Нормализованная мощность воздушной кермы от дофукусимского  $^{137}\text{Cs}$  на некультивируемых пастбищах и целинных землях (в среднем = 0,77 (нГр/ч)/(кБк/м<sup>2</sup>)) была примерно в 1,5 раза выше, чем таковая на культивируемых пастбищах и лугах, подверженных воздействию других антропогенных и природных факторов.

4. Результаты наших расчетов мощности воздушной кермы от фукусимского  $^{137}\text{Cs}$  хорошо согласуются с прогнозами модели НКДАР ООН 2013 г. [8, 18], которая

использовалась для оценки доз внешнего облучения населения Японии после Фукусимской аварии. Для дофукусимского  $^{137}\text{Cs}$  данная модель недооценивает рассчитанную нормализованную мощность воздушной кермы примерно на 40%.

5. Надземная биомасса травянистых растений практически не влияла на мощность воздушной кермы гамма-излучения радиоактивного цезия, содержащегося в почве.

## References (Литература)

1. IAEA – International Atomic Energy Agency. Generic Procedures for Monitoring in a Nuclear or Radiological Emergency, IAEA-TECDOC-1092. IAEA, Vienna, 1999.
2. Jacob, P., Roth, P., Golikov, V., Balonov, M., Erkin, V., Likhariov, I., Garger, E., Kashparov, V. Exposures from external radiation and from inhalation of resuspended material. In: The Radiological Consequences of the Chernobyl accident. European Commission, Brussels, 1996, pp. 251–260.
3. Golikov, V.Y., Balonov, M.I., Jacob, P. External exposure of the population living in areas of Russia contaminated due to the Chernobyl accident. *Radiat. Environ. Biophys.*, 2002, Vol. 41, No. 3, pp. 185–193.
4. IAEA – International Atomic Energy Agency. Chernobyl Forum Expert Group ‘Environment’. Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience. IAEA, Vienna, 2006.
5. UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2016 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. United Nations, New York, 2017.
6. UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly with Scientific Annexes. United Nations, New York, 2000.
7. ICRP – International Commission on Radiological Protection. Radionuclide Transformations – Energy and Intensity of Emissions. ICRP Publication 38. Ann. ICRP, 1983, Vol. 11–13.
8. UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2013 Report, Vol. 1, Scientific Annex A, Levels and Effects of Radiation Exposure due to the Nuclear Accident after the 2011 Great East-Japan Earthquake and Tsunami, Appendix C (Assessment of Doses to the Public). United Nations, New York, 2014.
9. Saito, K., Yamamoto, H., Mikami, S., Andoh, M., Matsuda, N., Kinase, S., Tsuda, T., Yoshida, T., Matsumoto, S., Sato, T., Seki, A., Takemiya, H. Radiological conditions in the environment around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant site. *Global Environmental Research*, 2016, Vol. 20, pp. 15–22.
10. ICRU – International Commission on Radiation Units and Measurements. Gamma-Ray Spectrometry in the Environment. ICRU report: 53. Bethesda, Maryland, 1994.
11. Jacob, P., Meckbach, R. Measurements after the Chernobyl accident in relation to the exposure of an urban population. In: Restoration of Environments Affected by Residues from Radiological Accidents: Approaches to Decision Making. IAEA-TECDOC-1131. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2000, pp. 34–41.
12. Ramzaev, V., Yonehara, H., Hille, R., Barkovsky, A., Mishine, A., Sahoo, S.K., Kurotaki, K., Uchiyama, M. Gamma-dose rates from terrestrial and Chernobyl radionuclides inside and outside settlements in the Bryansk Region, Russia in 1996–2003. *J. Environ. Radioact.*, 2006, Vol. 85, pp. 205–227.
13. Ramzaev, V.P., Golikov, V.Yu. A comparison of measured and calculated values of air kerma rates from  $^{137}\text{Cs}$  in soil. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2015, Vol. 8, No. 4, pp. 42–51. Russian (Рамзаев, В.П., Голиков, В.Ю. Сравнение расчетных и измеренных значений мощности кермы в воздухе над почвой, загрязненной  $^{137}\text{Cs}$ . *Радиационная гигиена*, 2015, Том 8, № 4, С. 42–51).
14. IAEA – International Atomic Energy Agency. Applicability of Monitored Natural Attenuation at Radioactively Contaminated Sites. Technical Reports Series No. 445. IAEA, Vienna, 2006.
15. Ramzaev, V., Barkovsky, A. Vertical distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in grassland soils disturbed by moles (*Talpa europaea* L.). *J. Environ. Radioact.*, 2018, Vol. 184–185, pp. 101–108.
16. Jacob, P., Likharev, I. (Eds.). EUR 16541 – Pathway Analysis and Dose Distributions. Joint Study Project 5. Final report. European Commission, Luxembourg, 1996.
17. Likharev, I.A., Kovgan, L.N., Jacob, P., Anspaugh, L.R. Chernobyl accident: external exposure of Ukrainian population due to radioactive contamination of territory (retrospective and prospective dose estimations). *Health Phys.*, 2002, Vol. 82, pp. 290–303.
18. UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Attachment C–12. Methodology for the Assessment of Dose from External Exposure and Inhalation of radioactive material. UNSCEAR 2013 Report, Vol. 1, Scientific Annex A, Levels and Effects of Radiation Exposure due to the Nuclear Accident after the 2011 Great East-Japan Earthquake and Tsunami, Appendix C (Assessment of Doses to the Public). United Nations, New York, 2014.
19. Ramzaev, V., Barkovsky, A., Goncharova, Yu., Gromov, A., Kaduka, M., Romanovich, I. Radiocesium fallout at the grasslands on Sakhalin, Kunashir and Shikotan Islands due to the Fukushima accident: the radioactive contamination of soil and plants in 2011. *J. Environ. Radioact.*, 2013, Vol. 118, pp. 128–142.
20. Ramzaev, V.P., Barkovsky, A.N., Gromov, A.V., Ivanov, S.A., Kaduka, M.V. Fukushima fallout in Sakhalin Region, Russia, part 1:  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{134}\text{Cs}$  in grassland soils. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2018, Vol. 11, No. 1, pp. 25–42.
21. Ramzaev, V.P., Barkovsky, A.N., Gromov, A.V., Ivanov, S.A., Kaduka, M.V. Fukushima fallout in Sakhalin Region, Russia, part 2:  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{134}\text{Cs}$  in grassland vegetation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2018, Vol. 11, No. 2, pp. 7–19.
22. Razzhigayeva, N.G., Ganzei, L.A., Mokhova, L.M., Pshenichnikova, N.F. Meadow landscapes of Southern Kurils: origin, age and development. *Geography and Natural Resources*, 2011, No. 3, pp. 96–104. Russian (Разжигаева, Н.Г., Ганзей, Л.А., Мохова, Л.М., Пшеничникова, Н.Ф. Луговые ландшафты Южных Курил: происхождение, возраст и развитие. *География и природные ресурсы*, 2011, № 3, С. 96–104).
23. Bulgakov, V.G., Vakulovsky, S.M., Kim, V.M., Polyanskaya, O.N., Uvarov, A.D., Yahryushin, V.N. Man-made radionuclides in the near-the-ground atmospheric layer due to the Fukushima accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2011, Vol. 4, No. 4, pp. 26–31. Russian (Булгаков, В.Г., Вакуловский, С.М., Ким, В.М., Полянская, О.Н., Уваров, А.Д., Яхрюшин, В.Н. Техногенные радионуклиды

- в приземном слое атмосферы вследствие аварии на АЭС Фукусима. Радиационная гигиена, 2011, Том 4, № 4, С. 26–31).
24. Saito, K., Jacob, P. Gamma ray fields in the air due to sources in the ground. Radiat. Prot. Dosimetry, 1995, Vol. 58, pp. 29–45.
  25. Golikov, V., Barkovski, A., Kulikov, V., Balonov, M., Rantavaara, A., Vetikko, V. Gamma ray exposure due to sources in the contaminated forest. In: I. Linkov and W.R. Schell (Eds.). Contaminated Forests – Recent Developments in Risk Identification and Future Perspective. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Contaminated Forests, Kiev, Ukraine 27–30 June 1998. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1999, pp. 333–341.
  26. Ramzaev, V., Repin, V., Medvedev, A., Khramtsov, E., Timofeeva, M., Yakovlev, V. Radiological investigations at the “Taiga” nuclear explosion site, part II: man-made  $\gamma$ -ray emitting radionuclides in the ground and the resultant kerma rate in air. J. Environ. Radioact., 2012, Vol. 109, pp. 1–12.
  27. Romanovich, I.K., Gromov, A.V., Goncharova, Yu.N. Preliminary analysis of the primary survey data of the radiation situation in the South-Eastern Sakhalin region after the Fukushima NPP accident. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene, 2011, Vol. 4, No. 1, pp. 36–42. Russian (Романович, И.К., Громов, А.В., Гончарова, Ю.Н. Предварительный анализ данных первичного обследования радиационной обстановки в юго-восточных районах Сахалинской области после аварии на АЭС «Фукусима-1». Радиационная гигиена, 2011, Том 4, № 3, С. 36–42).
  28. Shaw, G., Kliashtorin, A., Mamikhin, S., Shcheglov, A., Rafferty, B., Dvornik, A., Zhuchenko, T., Kuchma, N. Modelling radiocaesium fluxes in forest ecosystems. In: The Radioecological Consequences of the Chernobyl Accident. Proceedings of the First International Conference. Minsk, Belarus, 18 to 22 March 1996, EUR 16544EN. European Commission, Luxembourg, 1996, pp. 221–224.
  29. Beamish, D. Gamma ray attenuation in the soils of Northern Ireland, with special reference to peat. J. Environ. Radioact., 2013, Vol. 115, pp. 13–27.

Received: 13 January, 2019

Поступила: 13.01.2019 г.

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

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

**Барковский Анатолий Николаевич** – 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, Санкт-Петербург, Россия

**For citation (Для цитирования):** Ramzaev V.P., Barkovsky A.N. Estimation of the air kerma rate from  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{134}\text{Cs}$  deposited on the ground in the Sakhalin region of Russia after the Fukushima accident. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene, 2019, Vol. 12, No. 1, pp. 36-51. DOI: 10.21514/1998-426x-2019-12-1-36-51

## Риск смерти от болезней системы кровообращения в Уральской когорте аварийно-облученного населения за 1950–2015 годы

Л.Ю. Крестинина, С.С. Силкин, М.О. Дегтева, А.В. Аклев

Уральский научно-практический центр радиационной медицины ФМБА России, Челябинск, Россия

*В работе впервые представлены результаты исследования радиационных эффектов на примере анализа смерти от болезней системы кровообращения во вновь сформированной когорте, объединяющей население, облученное в период с 1950 по 1960 г. в двух радиационных инцидентах на Южном Урале (на реке Тече и на Восточно-Уральском радиоактивном следе). Численность сформированной когорты составила 60 205 человек. За 65-летний период наблюдения (1950–2015 гг.) в когорте зарегистрировано 14 830 смертей от всех болезней системы кровообращения, из них от ишемической болезни сердца – 6 163 случая смерти и от цереброваскулярных заболеваний – 4 388 случаев смерти. Анализ проведен на основе индивидуализированных оценок дозы, накопленной в мышечной ткани (включая внешнюю и внутреннюю компоненты дозы), рассчитанной на основе новой Дозиметрической системы реки Течи 2016. Согласно последним расчетам, средняя доза на мышечную ткань у членов объединенной когорты составила 34 мГр, а максимальная – 995 мГр. Для анализа применялась простая параметрическая модель избыточного относительного риска (ИОР). Число человеко-лет под риском составило 1 836 203. При анализе выявлено линейное увеличение риска смерти на единицу дозы от всех болезней системы кровообращения при 15-летнем латентном периоде (ИОР/100 мГр составил 3,0%; 95% ДИ: 0,8%; 5,2%) и от ишемической болезни сердца (ИОР/100 мГр составил 9,2%; 95% ДИ: 5,4%; 13,5%). Не получено доказательства статистически достоверного увеличения смертности от цереброваскулярных заболеваний в объединенной когорте населения, облученного на Южном Урале за 65-летний период. Полученные результаты согласуются с таковыми, полученными при анализе эффекта в когорте реки Теча, выполненного в 2013 г. за 53-летний период, где при 15-летнем минимальном латентном периоде была получена статистически значимая линейная зависимость от дозы для всех болезней системы кровообращения (ИОР/100 мГр – 3,6%) и для ишемической болезни сердца (ИОР/100 мГр – 5,6%).*

**Ключевые слова:** хроническое облучение, радиационный эффект, уровни смерти, избыточный относительный риск, ишемическая болезнь сердца, риск смерти от болезней системы кровообращения, когорта.

### Введение

Исследование влияния радиационного воздействия на смертность от болезней системы кровообращения в последние десятилетия активно проводится во многих когортах и популяциях. Наиболее известные детальные исследования были проведены в когорте выживших после атомной бомбардировки в Хиросиме и Нагасаки [1–2], которые показали наличие дозовой зависимости уровня смертности от всех болезней сердца и ишемической болезни сердца (ИБС) в диапазоне доз от 0 до 4 Гр, но не было получено четкого доказательства зависимости при дозах ниже 0,5 Гр. Наличие связи уровней смерти от сердечно-сосудистых заболеваний отмечается и среди ликвидаторов Чернобыльской аварии, и среди работников ПО «Маяк» на Южном Урале, и в других исследованиях [3–

5]. Население, облученное на Южном Урале вследствие деятельности ПО «Маяк», наблюдается в Уральском научно-практическом центре радиационной медицины (УНПЦ РМ) ФМБА России более 60 лет [6]. Предыдущие исследования смертности в когорте реки Течи, охватывающие период с 1950 по 2003 г. [7–8], показали увеличение риска смерти от ИБС и всех болезней системы кровообращения при минимальном латентном 15-летнем периоде, связанное с воздействием дозы.

**Цель исследования** – оценить избыточный относительный риск смерти от сердечно-сосудистых заболеваний в Уральской когорте аварийно-облученного населения. Исследование охватывает период, увеличенный на 12 лет, вдвое увеличенную численность когорты за счет объединения облученных лиц в двух радиационных инци-

Крестинина Людмила Юрьевна

Уральский научно-практический центр радиационной медицины ФМБА России.

Адрес для переписки: 454076, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: ludmila@urcrm.ru

дентах на Южном Урале (река Теча и Восточно-Уральский радиоактивный след), и основывается на дозах, рассчитанных по улучшенной дозиметрической системе TRDS-2016, что позволяет получить более надежные оценки ИОР смерти от сердечно-сосудистых заболеваний у населения при хроническом радиационном воздействии.

### Материалы и методы

#### Характеристики когорты

В 2018 г. в УНПЦ РМ создана объединенная когорта населения, облученного на Южном Урале, которая получила название Уральская когорта аварийно-облученного населения (УКАОН). Общая численность лиц УКАОН, по данным на сентябрь 2018 г., составляла 64 437 человек. В когорту для анализа (сохранившую название УКАОН) в соответствии с выработанными критериями включения и исключения к настоящему моменту включено 60 205 человек.

Когорта включает в себя лиц, получивших облучение на Южном Урале в результате проживания в одном из 41 прибрежных сел реки Теча или в одном из 33 населенных пунктов на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС) в период с 01.01.1950 по 31.12.1960 г., объединяя членов когорты реки Теча (КРТ), членов когорты Восточно-Уральского радиоактивного следа (КВУРС),

а также потомков КРТ и КВУРС. Так как предыдущие исследования не выявили особых эффектов у потомков облученных родителей, мы посчитали возможным объединить их в одну когорту при условии, что эти потомки сами получили облучение при проживании вместе с родителями на загрязненных территориях в период с 1950 по 1960 г. При анализе эффектов мы всегда сможем оценить особенности ответной реакции на дозу в этой группе лиц, используя индикатор принадлежности к потомкам или селекцию групп. В то же время мы имеем возможность расширить младшие возрастные группы в нашей когорте, а также увеличить общую численность когорты, что увеличивает статистическую силу исследования.

В таблице 1 представлены характеристики аналитической УКАОН и число случаев смерти от болезней системы кровообращения (БСК). В когорте наблюдается некоторое преобладание женщин над мужчинами (56%), связанное с послевоенным временем. По этническому признаку в когорте больше славян (72%), непереселившиеся жители составляют 64%. Облучившиеся потомки (группа: «родители облучены») составляют 17% (10 124 чел.), их возраст на 2015 г. составляет от 55 до 65 лет и число смертей от БСК у них составляет всего 3% от всех умерших в этой категории.

В таблице 1 также представлена средняя доза на мышечную ткань, накопленная за весь период наблюдения, у членов

Таблица 1

#### Демографические характеристики членов УКАОН

[Table 1

#### Demographic characteristics of the UCAEP members]

Параметры [Parameters]	Человек [Persons]	Средняя <sup>a</sup> доза, мГр [Mean dose, mGy <sup>a</sup> ]	Случаи смерти от причин [Deaths from]		
			БСК <sup>b</sup> [DCS <sup>b</sup> ]	ИБС <sup>c</sup> [IHD <sup>c</sup> ]	ЦВЗ <sup>d</sup> [CVD <sup>d</sup> ]
Мужчины [male]	26 613	36	6 048	2 748	1 546
Женщины [female]	33 592	39	8 782	3 415	2 842
Татары и башкиры [Tatars and Bashkirs]	17 135	52	4 061	1 710	1 195
Славяне [Slavs]	43 070	30	10 769	4 453	3 193
Переселены [resettled]	21 939	82	5 444	2 269	1 655
Не переселены [residents]	38 266	12	9 386	3 894	2 733
Родители не облучены [Parents are not exposed]	50 081	43	14 369	5 963	4 281
Родители облучены [Exposed parents]	10 124	17	461	200	107
Возраст на 31.12.1960 [Age as of 31.12.1960]			Достигнутый возраст [Attained age]		
0–16	20 275	22	43	0	3
17–39	22 644	35	237	64	29
40–59	10 330	38	1 969	818	424
> 60	6 956	42	12 581	5 281	3 932
Всего [Total]	60 205	36	14 830	6 163	4 388
%			100%	42%	30%

<sup>a</sup> – средневзвешенная по человеку-годам доза в группе; <sup>b</sup> – БСК – болезни системы кровообращения; <sup>c</sup> – ИБС – ишемическая болезнь сердца; <sup>d</sup> – ЦВЗ – цереброваскулярные заболевания  
[<sup>a</sup> – person-weighted average dose in group; <sup>b</sup> – Diseases of the circulatory system; <sup>c</sup> – Ischemic heart diseases; <sup>d</sup> – Cerebrovascular diseases].

когорты в зависимости от демографических характеристик. Наибольшие различия в накопленной дозе наблюдаются среди переселенных и непереселявшихся лиц (для переселенных средняя доза 82 мГр и максимальная 995 мГр, а для непереселявшихся – 12 и 153 мГр соответственно).

*Случаи смерти*

За 65-летний период в УКАОН на территории наблюдения умерло 31 934 человека, для 28 919 (91%) причина смерти подтверждена свидетельством о смерти. Число лиц, умерших от болезней системы кровообра-

щения, составило 14 830, в том числе у мужчин – 6 048, у женщин – 8 782.

В таблице 2 представлены наиболее частые причины смерти членов объединенной когорты за 65-летний период. Как и для всего населения страны, наиболее частой причиной смерти в УКАОН за указанный период являлись болезни системы кровообращения (51%) и новообразования (15%). Смерти от травм отравлений и несчастных случаев составили около 11% во всей когорте, отдельно у мужчин – до 17%, а у женщин эти причины занимают четвертое место, уступив болезням органов дыхания (7%).

**Структура наиболее частых причин смерти в УКАОН по классам МКБ-9**

Таблица 2

[Table 2]

**Structure of the most frequent causes of death ]**

Класс МКБ 9 [Class ICD-9]	Причины смерти, МКБ-9 [Cause of death, ICD-9]	Мужчины [Male]	Женщины [Female]	Всего [Total]			
7	Болезни системы кровообращения [Diseases of the circulatory system]	6 048	42,8%	8 782	59,4%	14 830	51,3%
2	Новообразования [Neoplasms]	2 341	16,6%	2 066	14,0%	4 407	15,2%
17	Травмы, отравления и другие последствия внешних причин [External causes]	2 353	16,6%	730	4,9%	3 083	10,7%
8	Болезни органов дыхания [Diseases of the respiratory system]	1 374	9,7%	1 036	7,0%	2 410	8,3%
1	Инфекционные болезни [Infections]	667	4,7%	387	2,6%	1 054	3,6%
3–6, 9–16	Остальные причины смерти [Other causes]	1 361	10%	1 774	12%	3 135	11%
1–17	Всего [Total]	14 144	100%	14 775	100%	28 919	100%

В данной работе описан анализ риска смерти от наиболее частых причин – от всех БСК, а также отдельно от ишемической болезни сердца (ИБС) и цереброваскулярных заболеваний (ЦВЗ) в связи с радиационным воздействием. За весь период в когорте было зарегистрировано 14 830 случаев смерти от БСК, из них случаи ИБС составили почти 42%, а цереброваскулярные заболевания – около 30%. Число человеко-лет под риском при проживании на территории наблюдения за смертностью (ТН), включающей всю Челябинскую и Курганскую область, у членов когорты составило 1 836 203. Число умерших лиц от отдельных причин БСК в зависимости от демографических характеристик (по полу, возрасту, национальности, факту переселения, области начала облучения, факту облучения родителей) в каждой из рассматриваемых групп представлено ранее в таблице 1.

*Жизненный статус*

В таблице 3 представлен жизненный статус членов когорты на конец 2015 г. по данным на сентябрь 2018 г. Из таблицы можно видеть, что 18% (10 734 чел.) мигрировали с территории наблюдения (Челябинской и Курганской области). Среди 49 471 проживавших на ТН, 31 934 чел. (65%) умерли (из них на 91% имеется информация о причине смерти), 24% (11 948 чел.) членов когорты живы

на дату последнего известного адреса на ТН, для 11% информация о статусе на конец периода наблюдения (31.12.2015 г.) не известна.

Таблица 3

**Жизненный статус членов УКАОН**

[Table 3]

**Vital status of UCAEP members]**

Жизненный статус [Vital status]	Число лиц [Number of persons]	%
Жив [Alive]	11948	24%
Умер [Deceased]	31934	65%
причина известна [cause known]	28919	91%
причина не известна [cause unknown]	3015	9%
Потерянные [Lost]	5589	11%
Всего на ТН [Total in catchment area]	49471	100%
Мигрант [Migrants]	10734	18%
Всего [Total]	60205	100%

Дозы

В 2016 г. для расчета доз облучения людей, проживавших в населенных пунктах на реке Тече и территории ВУРСа, была разработана единая дозиметрическая система TRDS-2016. Эта система представляет собой программный комплекс для расчета индивидуальных доз внешнего и внутреннего облучения 23 органов тела человека на основе данных об истории его проживания на загрязненных территориях, с учетом пола и возраста. Большой объем данных по содержанию радионуклидов в организме человека и объектах окружающей среды был использован при разработке дозиметрической системы. В системные БД включена информация по уровням внешнего  $\gamma$ -облучения и радиоактивного загрязнения рационов питания в 41 населенном пункте на р. Теча, начиная с 1950 г., и 83 населенных пунктах на ВУРСе (с начальной плотностью загрязнения по  $^{90}\text{Sr} > 0,1 \text{ Ки/км}^2$ ), начиная с 1957 г. Расчеты доз проводятся для восьми радионуклидов ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ). В дозиметрической системе учитываются возрастные изменения параметров метаболизма и размеров тела человека, возрастные различия в рационе питания и режимах поведения [9–11].

История проживания на загрязненных территориях позволяет восстановить индивидуальный сценарий внешнего облучения и индивидуальный режим поступления радионуклидов в организм. Индивидуальная доза рассчитывается по годам, начиная с даты вступления в когорту и до даты смерти или до года получения последней информации о жизненном статусе человека. Сотрудниками биофизической лаборатории УНПЦ РМ были рассчитаны индивидуализированные дозы на всех членов когорты по TRDS-2016. Для оценки риска смерти от сердечно-сосудистых заболеваний была использована доза на мышечную ткань. На рисунке 1 представлено распределение всех членов когорты по дозе, накопленной в мышечной ткани, которая включает как внешнюю, так и внутреннюю компоненту дозы.

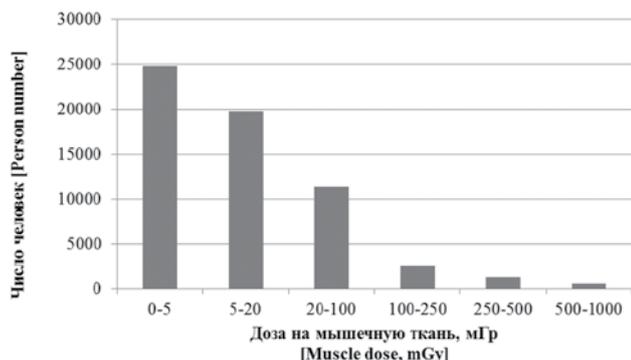


Рис. 1. Распределение членов когорты по дозовым группам [Fig. 1. Distribution of cohort members by dose groups]

Распределения доз в УКАОН имеют явно выраженную асимметрию. Можно видеть, что большая часть когорты (93%) получила дозу до 100 мГр (диапазон малых доз). У половины членов когорты дозы на мышечную ткань не превышают 8 мГр (медиана), максимальная доза на мышечную ткань у членов УКАОН составила 995 мГр, а средняя доза – 34 мГр.

Методы статистического анализа

Многофакторный анализ зависимости показателей смертности от радиационных и нерадиационных факторов был проведен с помощью программ DATAV и AMFIT статистического пакета EPICURE [12] и использованием простой параметрической модели избыточного относительного риска (ИОР).

Базовая модель ИОР для расчета уровней смертности от болезней системы кровообращения может быть представлена следующим образом:

$$\lambda(a, d, z) = \lambda_0(a, z_0)(1 + \rho(d)\varepsilon(z_1)) \quad (1)$$

где:

$\lambda$  – уровень смертности от БСК,

$\lambda_0$  – базовый уровень смертности от БСК,

$a$  – достигнутый возраст,

$d$  – доза,

$z$  – факторы, которые могут влиять на уровни смертности от БСК,

$z_0$  – факторы, которые могут влиять на базовые уровни ( $\lambda_0$ ),

$z_1$  – факторы, которые могут модифицировать ИОР.

Избыточный риск описан как произведение функции дозового ответа  $\rho(d)$  на функцию модификации эф-фекта ( $\varepsilon(z_1)$ ).

Тестирование дозовой зависимости проводилось с использованием линейной и квадратичной моделей.

С помощью программы DATAV пакета EPICURE были созданы таблицы человеко-лет и случаев БСК со стратификацией по полу, национальности (славяне; татары и башкиры), календарному периоду наблюдения (до 1986 г. и после), факту переселения, области проживания на начало облучения (Челябинской или Курганской), факту облучения родителей, критерию оценки влияния года рождения членов когорты «birth cohort effect» (до 1935 г.р. или после 1935 г.р.), возрасту на начало облучения (10-летние категории от 10 до 60 и более лет) и достигнутому возрасту (по 5-летиям, начиная от 0 по 80 и более лет), а также по дозовым категориям, со следующими нижними границами дозы на мышечную ткань: 0, 0,005, 0,02, 0,1, 0,2 и 0,3 Гр. В качестве дозы использована доза, накопленная в мышечной ткани за весь период до даты конца наблюдения (дата смерти или миграции с территории наблюдения или 31.12.2015 г.). Статистическая значимость определялась с помощью метода максимального правдоподобия, доверительные интервалы – с 95% значимостью.

Результаты и обсуждение

Анализ риска смертности от болезней системы кровообращения

Оценка базовых уровней

Для оценки зависимости базовых уровней смертности от всех БСК, а также ИБС и ЦВЗ от нерадиационных факторов с помощью программы AMFIT тестировались все указанные выше переменные (пол, национальность, календарный период наблюдения, область проживания на начало облучения, факт переселения, факт облучения родителей, год рождения, возраст на начало облучения, а также

степенная зависимость от достигнутого возраста в виде логарифма и квадрата логарифма достигнутого возраста). При этом статистически значимая зависимость базовых уровней смертности от всех БСК и от ИБС была выявлена от пола ( $p < 0,001$ ), национальности ( $p < 0,001$ ), области проживания на начало облучения ( $p < 0,001$ ), года рождения членов когорты ( $p = 0,003$ ) и достигнутого возраста ( $p < 0,001$ ), включенного в модель для расчета базовых уровней в виде логарифма и квадрата логарифма достигнутого возраста, связанного с полом. Базовые уровни смертности от цереброваскулярных заболеваний, кроме перечисленных, зависели еще от факта переселения, факта облучения родителей и от календарного периода (до или после 1986 г.), что было учтено при анализе дозовой зависимости.

*Оценка дозовой зависимости*

Поскольку члены УКАОН получили дозу на мышцы менее 1 Гр, а время, необходимое для реализации радиационно-связанного случая БСК, ИБС или ЦВЗ после продолжительного воздействия облучения в низких дозах и низких мощностях доз изучено недостаточно, то риск смерти в УКАОН был рассчитан с использованием разных минимальных латентных периодов (0, 2, 5, 10, 15 лет). Так как максимальная доза у членов когорты не достигала 1 Гр, а средняя составила 34 мГр, то величину ИОР смерти мы оцениваем на 100 мГр (а не на 1 Гр) и указываем в процентах. В таблице 4 представлены величины избыточного относительного риска смерти от БСК, ИБС и ЦВЗ на 100 мГр при использовании линейной зависимости эффекта от дозы при различных минимальных латентных периодах.

Статистически значимое значение ИОР было получено для всех БСК только при 15-летнем латентном периоде, для ИБС – при всех латентных периодах, а для ЦВЗ величины ИОР были положительными, но незначимыми при всех латентных периодах. В связи с указанным, для лучшей сопоставимости результатов был выбран минимальный латентный период, равный 15 годам. Для всех БСК ИОР/100мГр составил 3,0% (95% ДИ: 0,8%; 5,2%),  $p = 0,006$ , для ИБС ИОР/100мГр составил 9,2% (95% ДИ: 5,4%; 13,5%)  $p < 0,001$ , а для ЦВЗ – 3,4% (95% ДИ: – 0,7%; 8,2%)  $p = 0,1$ .

Не было получено достоверного улучшения подгонки модели при тестировании линейно-квадратичной и квадратичной зависимости эффекта от дозы, хотя величины ИОР при использовании квадратичной модели были значимы для всех БСК (ИОР/100мГр составил 5,9% (95% ДИ: 1,4%; 10,8%),  $p < 0,009$ ); и для ИБС (ИОР/100мГр = 13,8% (95% ДИ: 6,1%; 22,3%),  $p < 0,001$ ). Для ЦВЗ значения ИОР при использовании квадратичной модели были положительными: ИОР/100мГр = 6,1% (95% ДИ: – 2,2%; 15,8%), но не значимы ( $p = 0,16$ ), как и при линейной модели.

На рисунке 2 представлена линейная дозовая зависимость ИОР смерти от всех БСК и от ИБС. Чтобы не перегружать график, статистически незначимая дозовая зависимость смерти от цереброваскулярных заболеваний не представлена.

В таблице 5 представлены человеко-годы, наблюдаемые случаи, а также избыточные случаи по дозовым категориям, рассчитанные по линейной модели с 15-летним минимальным латентным периодом. Для смерти от всех БСК избыточные случаи, связанные с воздействием радиации за 65-лет-

Таблица 4

**Величины избыточного относительного риска смерти от болезней системы кровообращения в зависимости от минимального латентного периода**

[Table 4]

**Excess relative risk values of death from diseases of the circulatory system, depending on the minimum latent period**

Линейная модель, показатели [Linear model, indicators]	Минимальный латентный период [Minimum latent period]				
	0 лет [0 years]	2 года [2 years]	5 лет [5 years]	10 лет [10 years]	15 лет [15 years]
БСК [DCS-diseases of the circulatory system]					
ИОР/100 мГр, % [ERR/100mGy, %] (95% ДИ), [95% CI] P	0,7 -1,1; 2,6 0,46	0,95 -8,0; 2,9 0,32	1,2 -7; 3,2 0,22	1,9 -5; 4,0 0,056	<b>3,0</b> <b>0,8; 5,2</b> <b>0.006</b>
ИБС [IHD- Ischemic heart diseases]					
ИОР/100 мГр, % [ERR/100mGy, %] (95% ДИ), [95% CI] P	<b>4,7</b> <b>1,4; 8,2</b> <b>0,004</b>	<b>5,3</b> <b>2,0; 8,9</b> <b>0,0013</b>	<b>6,4</b> <b>2,9; 10,1</b> <b>&lt;0.001</b>	<b>7,9</b> <b>4,2; 11,9</b> <b>&lt;0.001</b>	<b>9,2</b> <b>5,4; 13,5</b> <b>&lt;0.001</b>
ЦВЗ [CVD-cerebrovascular diseases]					
ИОР/100 мГр, % [ERR/100mGy, %] (95% ДИ), [95% CI] P	1,4 -2,3; 5,7 0,48	1,7 -2,1; 6,0 0,4	2,3 -1,6; 6,7 0,26	3,0 -0,9; 7,6 0,15	3,4 -0,7; 8,2 0,1

Жирным шрифтом выделены статистически значимые значения ИОР с 95% вероятностью  
[Notes: statistically significant ERR values with 95% probability are given in bold type].

Распределение случаев смерти и рассчитанного избытка по дозовым группам с 15-летним лагом

Таблица 5

[Table 5]

Distribution of observed and excess deaths by dose groups with a 15-year lag

Дозовые группы, мГр [Dose groups, mGy]	Человеко-годы [Person-years]	Все БСК [DCS]		ИБС [IHD]		ЦВЗ [CVD]	
		всего случаев [deaths]	рассчитанный избыток [excess]	всего случаев [deaths]	рассчитанный избыток [excess]	всего случаев [deaths]	рассчитанный избыток [excess]
0-5	1 130 550	6 161	1,9	2 252	2,5	1 728	0,7
5-20	357 507	4 602	14,9	2 064	19,7	1 306	5,2
20-100	250 559	2 851	44,5	1 289	58,1	945	16,9
100-200	46 856	579	21,9	269	28,6	195	8,1
200-300	19 090	209	15,3	101	19,6	70	5,5
≥ 300	31 641	428	51,1	188	64,0	144	19
Всего	1 836 203	14 830	149,6	6 163	192,6	4 388	55,4
Атрибутивный риск, % [Attributive risk]		1,01%		3,12%		1,3%	

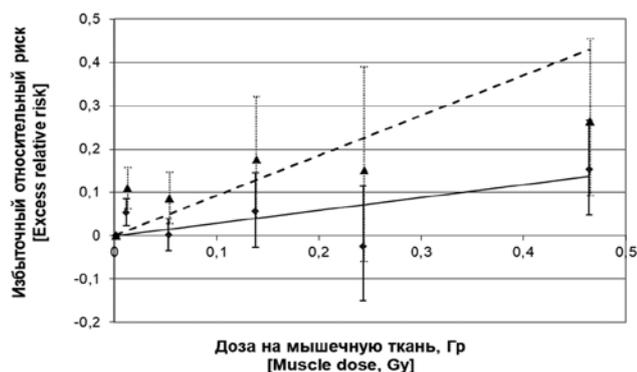


Рис. 2. Дозовая зависимость ИОР смерти от всех БСК (сплошная линия) и смерти от ИБС (штриховая линия) согласно линейной модели с 15-летним минимальным латентным периодом. Точки – непараметрические оценки в дозовых группах: треугольники – ИБС, ромбы – БСК

[Fig. 2. Dose dependence of ERR of all circulatory system disease (DCS) mortality (solid line) and of ischemic heart disease (IHD) mortality (dash line) with 15-year minimum latent period. Points are the nonparametric values in dose groups: triangles – IHD, diamonds – DCS]

ний период, могли составить 150 из 14 830, для ИБС – 193 из 6163 случаев, для ЦВЗ предполагаемое (статистически незначимое) число случаев, связанных с радиацией в УКАОН за 65-летний период, могло составить 55 случаев.

В последней строке таблицы 5 указана доля случаев, которые могут быть атрибутированы радиации. Можно видеть, что в целом в УКАОН атрибутивный риск не был высоким, для всех БСК он составил 1%, для ИБС – 3%, а для ЦВЗ – 1%.

Оценка модификации дозового ответа

Для ИОР смерти от всех болезней системы кровообращения, отдельно от ИБС и ЦВЗ, рассчитанных по линейной модели и с использованием 15-летнего минимального латентного периода, была оценена модификация дозового ответа различными нерадиационными факторами, такими как пол, национальность, факт облучения родителей, возраст к началу облучения, достигнутый возраст, факт переселения, календарный период (табл. 6).

Оценка модификации осуществлялась с использованием программы AMFIT статистического пакета EPICURE.

При анализе не было получено значимой модификации эффекта в зависимости от пола, национальности, факта облучения родителей, календарного периода, воз-

Модификация ИОР смерти нерадиационными факторами

Таблица 6

[Table 6]

ERR modification by non-radiation factors

Параметры [Parameters]	ИОР /100мГр (95% ДИ), % [ERR/100 mGy (95%CI)], %		
	БСК [DCS]	ИБС [IHD]	ЦВЗ [CVD]
Вся когорта [Total cohort]	<b>3,0 (0,8;5,2)</b>	<b>9,2 (5,4;13,5)</b>	3,4 (-0,7; 8,2)
Мужчины [Male]	<b>4,9 (1,4; 8,8)</b>	<b>12,4 (6,4;19,2)</b>	2,7 (-8;0 10,6)
Женщины [Female]	1,8 (-0,7; 4,6)	<b>7,0 (2,3; 12,3)</b>	3,7 (-10; 9,3)
Татары и башкиры [Tatars and Bashkirs]	<b>7,5 (3,0; 12,4)</b>	<b>16,9 (8,4;26,7)</b>	<b>15 (5,8; 29,9)</b>
Славяне [Slavs]	1,5 (-0,8;4,0)	<b>7,0 (2,8; 11,6)</b>	0,3 (nf <0; 5,1)

Параметры [Parameters]	ИОР /100мГр (95% ДИ), % [ERR/100 mGy (95%CI)], %		
	БСК [DCS]	ИБС [IHD]	ЦВЗ [CVD]
Родители не облучены [Parents are not exposed]	<b>3,0 (0,9; 5,2)</b>	<b>9,1 (5,3; 13,3)</b>	3,6 (nf <0,8; 8,4)
Родители облучены [Exposed parents]	0,7 (-16,4; 23,1)	22,7 (-6,5; 62,2)	-22,1 (<-23,6; nf<-20,0)
Возраст к началу облучения [Age at exposure]			
10 лет [years]	<b>4,0 (10,0; 7,7)</b>	<b>13,9 (7,8; 21,0)</b>	2,7 (nf<-2,6; 7,5)
30 лет [years]	<b>2,9 (0,5; 5,1)</b>	<b>7,9 (2,7; 12,5)</b>	3,8 (nf <1,5; nf>4,3)
Достигнутый возраст [Attained age]			
40 лет [years]	2,7 (nf -0,5; 14,3)	<b>37,6 (15,8; 67,9)</b>	0,6 (nf <0,1; nf >2,1)
60 лет [years]	<b>2,9 (0,3; 5,9)</b>	<b>13,9 (8,7; 19,7)</b>	1,8 (nf <0,6; nf >2,3)
Календарный период [Calendar period]			
До [before] 1986	1,3 (-2,1; 5,1)	<b>9,2 (2,5; 17,0)</b>	6,6 (-2,0; 17,6)
После [after] 1986	3,7 (1,2; 6,4)	<b>9,3 (4,9; 14,1)</b>	2,7 (-1,7; 7,8)

nf (not found) – граница доверительного интервала не может быть точно вычислена программой; жирным шрифтом выделены значимые величины риска

[nf – exact confidence interval bound was not found by program; statistically significant ERR values with 95% probability are given in bold type]

раста на начало облучения или достигнутого возраста. Однако отмечена тенденция к повышению ИОР для всех БСК, ИБС и ЦВЗ у мужчин относительно женщин, у татар и башкир относительно славян.

Можно отметить, что в группе у облученных потомков в связи с очень малым числом умерших наблюдается тенденция к более низким показателям смертности, с большим диапазоном неопределенности. Также можно отметить, что для случаев смерти от ИБС наблюдается тенденция (статистически незначимая) снижения риска с увеличением как достигнутого возраста, так и возраста начала облучения.

### Заключение

В работе впервые представлены результаты исследования радиационных эффектов во вновь сформированной когорте, объединяющей население, облученное в период с 1950 по 1960 г. в двух радиационных инцидентах на Южном Урале. Для анализа использованы дозы, накопленные в мышечной ткани за весь период наблюдения (с 1950 по 2015 г.), рассчитанные по новой дозиметрической системе 2016. Согласно новым расчетам, максимальная доза на мышечную ткань увеличилась с 510 мГр в КРТ (по TRDS-2009) [7] до 995 мГр (TRDS-2016), средняя доза в исследуемой объединенной когорте не изменилась относительно таковой в анализируемой ранее КРТ (34 и 35 мГр соответственно). Численность объединенной когорты увеличилась по сравнению с КРТ в два раза и составила 60 205 человек, соответственно в 2 раза увеличилось число смертей от всех БСК и составило 14 830, из них от ИБС – 6 163, от ЦВЗ – 4 388.

Хорошо известно, что на развитие заболеваний сердечно-сосудистой системы влияет много факторов, которые играют более важную роль, чем радиационный фактор. В нашей когорте мы располагаем клинической информацией и информацией об

употреблении алкоголя и курении только для ограниченного числа людей, поэтому не смогли оценить эти эффекты. Однако важно отметить, что влияние указанных факторов, также как и таких, как наличие диабета, артериальной гипертензии, повышенного уровня холестерина, избыточного веса и других факторов риска смерти от сердечно-сосудистых заболеваний, возможно только при значимой корреляции их воздействия с дозой облучения, что является маловероятным при неконтролируемом аварийном облучении.

В то же время влияние социальных факторов и уровня медицинского обслуживания на здоровье населения косвенно учитывалось через использование таких временных переменных, как календарный период (до 1986 г. – начало перестройки, и после 1986 г.) и год рождения членов когорты (до 1935 г. и после). Все доступные нерадиационные факторы (пол, возраст начала облучения, достигнутый возраст, национальность, календарный период, год рождения членов когорты, область проживания на начало облучения, факт переселения, факт облучения родителей) были включены в анализ, а исходные уровни смертности были скорректированы по тем показателям, которые значимо влияли на изучаемые уровни смертности.

При анализе выявлено линейное увеличение риска смерти облученных лиц от всех БСК и ИБС на единицу дозы при 15-летнем латентном периоде. ИОР на 100 мГр для всех БСК составил 3% (95% ДИ: 0,8%; 5,2%), для ИБС ИОР на 100 мГр 9,2% (95% ДИ: 5,4%; 13,5%). Не получено доказательства статистически достоверного увеличения смертности от ЦВЗ за 65-летний период.

Наблюдается также тенденция к уменьшению риска смерти от ИБС при увеличении возраста начала облучения и достигнутого возраста, тогда как для всех БСК такая тенденция наблюдается только для возраста начала облучения.

Полученные результаты хорошо согласуются с предыдущими данными, полученными при анализе эффекта в

когорте реки Течи, выполненного в 2013 г. [7–8], где была получена статистически значимая линейная зависимость от дозы для всех БСК при 15-летнем минимальном латентном периоде (ИОР на 100 мГр составлял 3,6%, и 5,6% на 100 мГр – для ИБС).

В данной работе впервые приведены результаты анализа эффектов в расширенной когорте аварийно-облученного населения Южного Урала, наблюдение за членами которой продолжается на системной основе, и в дальнейшем будет проводиться более детальный анализ риска, связанного с воздействием радиации на здоровье членов когорты.

### Литература

1. Preston DL, Shimizu Y, Pierce DA, Suyama A, Mabuchi K. Studies of the mortality of atomic bomb survivors. Report 13: solid cancer and noncancer disease mortality: 1950-1997. *Radiation Res.* 2003; 160 (4): 381-407.
2. Shimizu Yu, Kodama K, Nishi N, Kasagi F, Suyama A, Soda M, Grant EJ, Sugiyama H, Sakata R, Moriwaki H, Hayashi M, Konda M, Shore RE. Radiation exposure and circulatory disease risk: Hiroshima and Nagasaki atomic bomb survivor data, 1950-2003. *BMJ.* 2010; 340 doi: <https://doi.org/10.1136/bmj.b5349>
3. Ivanov VK. Late cancer and noncancer risks among Chernobyl emergency workers of Russia. *Health Phys.* 2007; 93: 470-479.
4. Little MP, Tawn EJ, Tzoulaki I, Wakeford R, Hildebrandt G, Paris F, Tapio S, Elliot P. Review and meta-analysis of epidemiological associations between low or moderate doses of ionizing radiation and circulatory disease risks, and their possible mechanisms. *Radiat. Environ. Biophys.* 2010; 49 (2):139-153.
5. Azizova TV, Muirhead CR, Druzhinina MB, Grigoryeva ES, Vlasenko EV, Sumina MV, O'Hagan JA, Zhang W, Haylock RGE and Hunter N. Cardiovascular Diseases in the Cohort of Workers First Employed at Mayak PA in 1948–1958. *Radiat Res.* 2010; 174:155-168.
6. Аклеев, А.В. Здоровье населения, проживающего на радиоактивных территориях Уральского региона / А.В. Аклеев [и др.]. – Москва: РАДЭКОН, 2001. – 194 с.
7. Krestinina LY, Epifanova S, Silkin S, Mikryukova L, Degteva M, Shagina N, Akleyev A. Chronic low-dose exposure in the Techa River Cohort: risk of mortality from circulatory diseases. *Radiat. Environ. Biophys.* 2013;52:47–57; DOI: 10.1007/s00411-012-0438-5.
8. Крестинина, Л.Ю. Отдаленные соматико-стохастические эффекты / Л.Ю. Крестинина, А.В. Аклеев; ред. А.В. Аклеева // Последствия радиоактивного загрязнения реки Течи. – Челябинск, 2016. – гл.9. – С. 270–330.
9. Tolstykh EI, Degteva MO, Peremyslova LM, Shagina NB, Vorobiova MI, Anspaugh LR, Napier BA. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: <sup>137</sup>Cs. *Health Phys.* 2013; 104(5):481–498.
10. Tolstykh EI, Peremyslova LM, Degteva MO, Napier BA. Reconstruction of radionuclide intakes for the residents of East Urals Radioactive Trace (1957-2011). *Radiat. Environ. Biophys.*, 2017, 56, pp. 27-45; DOI 10.1007/s00411-016-0677-y.
11. Shagina NB, Tolstykh EI, Degteva MO, Anspaugh LR, Napier BA. Age and gender specific biokinetic model for strontium in humans. *J. Radiol. Prot.* 2015; 35(1):87-127.
12. Preston DL, Lubin J, Pierce D, and McConney. *Epicure Users Guide*. Seattle, Washington: Hirosoft International Company; 1993.

Поступила: 02.11.2018 г.

**Крестинина Людмила Юрьевна** – кандидат медицинских наук, заведующая эпидемиологической лабораторией Уральского научно-практического центра радиационной медицины ФМБА России. **Адрес для переписки:** 454076, Россия, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А.; E-mail: [ludmila@urcrm.ru](mailto:ludmila@urcrm.ru)

**Силкин Станислав Сергеевич** – младший научный сотрудник эпидемиологической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины ФМБА России, Челябинск, Россия.

**Дегтева Марина Олеговна** – кандидат технических наук, заведующая биофизической лабораторией Уральского научно-практического центра радиационной медицины ФМБА России, Челябинск, Россия.

**Аклеев Александр Васильевич** – доктор медицинских наук, профессор, директор Уральского научно-практического центра радиационной медицины ФМБА России, Челябинск, Россия.

**Для цитирования:** Крестинина Л.Ю., Силкин С.С., Дегтева М.О., Аклеев А.В. Риск смерти от болезней системы кровообращения в Уральской когорте аварийно-облученного населения за 1950–2015 годы // *Радиационная гигиена*. – 2019. – Т. 12, № 1. – С. 52-61. DOI: 10.21514/1998-426x-2019-12-1-52-61

## Risk analysis of the mortality from the diseases of the circulatory system in the Ural cohort of emergency-irradiated population for the years 1950–2015

Lyudmila Yu. Krestinina, Stanislav S. Silkin, Marina O. Degteva, Alexander V. Akleyev

Urals Research Center for Radiation Medicine, Chelyabinsk, Russia

*The paper describes for the first time the results of the radiation effect study using the example of the analysis of circulatory system disease mortality in newly established cohort combining the population exposed in 1950–1960 due to 2 radiation incidents in the Southern Urals (the Techa River and East-Urals radioactive Trace). The cohort consists of 60,205 people. Over a 65-year follow up period 14,830 deaths from all diseases of the circulatory system were registered. Out of this number 6,163 deaths were from ischemic heart disease, and 4,388 deaths were from cerebrovascular diseases. Analysis was performed on the basis of individualized estimates of dose accumulated in muscle tissue (both internal and external components of the dose), calculated with new Techa River Dosimetry System 2016. As per the latest calculations, mean dose to muscle tissue in members of the combined cohort was 34 mGy, maximum dose was 995 mGy. Simple parametric model of excess relative risk (ERR) was used in the analysis. The number of person-years at risk was 1836,203. The findings of the analysis show linear increase of mortality risk per unit dose from all the disease of circulatory system (ERR/100 mGy was 3%; 95% CI: 0,8%; 5,2%) and from ischemic heart disease (ERR/100 mGy was 9,2%; 95% CI: 5,4%; 13,5%) with 15-year latent period. No statistically significant increase in mortality from the cerebrovascular diseases in the combined cohort of the population exposed in the Southern Urals over a 65-year period received evidence. The obtained results are in good agreement with those received in the analysis of the effect in the Techa River Cohort in 2013. The latter covered a 53-year period (with minimum latent period of 15 years) and revealed statistically significant linear dose response for all diseases of the circulatory system (ERR/100 mGy – 0.036) and ischemic heart disease (ERR/100 mGy – 0.056).*

**Key words:** chronic exposure, radiation effect, mortality rate, excess relative risk, ischemic heart disease, risk of mortality from circulatory system diseases, cohort

### References

1. Preston DL, Shimizu Y, Pierce DA, Suyama A, Mabuchi K. Studies of the mortality of atomic bomb survivors. Report 13: solid cancer and noncancer disease mortality: 1950-1997. *Radiation Res.* 2003; 160 (4): 381-407.
2. Shimizu Yu, Kodama K, Nishi N, Kasagi F, Suyama A, Soda M, Grant EJ, Sugiyama H, Sakata R, Moriwaki H, Hayashi M, Konda M, Shore RE. Radiation exposure and circulatory disease risk: Hiroshima and Nagasaki atomic bomb survivor data, 1950-2003. *BMJ.* 2010; 340 doi: <https://doi.org/10.1136/bmj.b5349>
3. Ivanov VK. Late Cancer and noncancer risks among Chernobyl emergency workers of Russia. *Health Phys.* 2007; 93: 470-479.
4. Little MP, Tawn EJ, Tzoulaki I, Wakeford R, Hildebrandt G, Paris F, Tapio S, Elliot P. Review and meta-analysis of epidemiological associations between low or moderate doses of ionizing radiation and circulatory disease risks, and their possible mechanisms. *Radiat Environ Biophys.* 2010; 49 (2):139-153.
5. Azizova TV, Muirhead CR, Druzhinina MB, Grigoryeva ES, Vlasenko EV, Sumina MV, O'Hagan JA, Zhang W, Haylock RGE and Hunter N. Cardiovascular Diseases in the Cohort of Workers First Employed at Mayak PA in 1948–1958. *Radiat Res.* 2010; 174:155-168.
6. Akleyev A.V. [et al.]. Health status of the population residing in the South Urals territories contaminated with radionuclides. Moscow: RADECON, 2001, 194 p. (in Russian)
7. Krestinina LY, Epifanova S, Silkin S, Mikryukova L, Degteva M, Shagina N, Akleyev A. Chronic low-dose exposure in the Techa River Cohort: risk of mortality from circulatory diseases. *Radiat Environ Biophys.* 2013; 52: 47–57; DOI: 10.1007/s00411-012-0438-5.
8. Krestinina LY, Akleev AV. Long-term somatic-stochastic effects. Edited. by AV. Akleev. Consequences of radioactive contamination of the Techa River. Chelyabinsk, 2016, Chapter 9, pp. 270-330. (in Russian)
9. Tolstykh EI, Degteva MO, Peremyslova LM, Shagina NB, Vorobiova MI, Anspaugh LR, Napier BA. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: <sup>137</sup>Cs. *Health Phys.* 2013; 104(5):481–498.
10. Tolstykh EI, Peremyslova LM, Degteva MO, Napier BA. Reconstruction of radionuclide intakes for the residents of East Urals Radioactive Trace (1957-2011). *Radiat. Environ. Biophys.*, 2017, 56, pp. 27-45; DOI 10.1007/s00411-016-0677-y.
11. Shagina NB, Tolstykh EI, Degteva MO, Anspaugh LR, Napier BA. Age and gender specific biokinetic model for strontium in humans. *J Radiol Prot.* 2015; 35(1):87-127.
12. Preston DL, Lubin J, Pierce D, and McConney. *Epicure Users Guide.* Seattle, Washington: Hirosoft International Company; c 1993.

Received: November 2, 2018

**Lyudmila Yu. Krestinina**

Urals Research Center for Radiation Medicine

**Address for correspondence:** Vorovskogo Str., 68-A, Chelyabinsk, 454076, Russia; E -mail: [ludmila@urcrm.ru](mailto:ludmila@urcrm.ru)

**For correspondence: Lyudmila Yu Krestinina** – Candidate of Medical Science, Head, Epidemiological laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency (Vorovskogo Str., 68-a, Chelyabinsk, 454076, Russia; e-mail: ludmila@urcrm.ru)

**Stanislav S. Silkin** – Junior Researcher of Epidemiological laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency, Chelyabinsk, Russia.

**Marina O. Degteva** – Candidate of Technical Science, Head, biophysical laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency, Chelyabinsk, Russia.

**Alexander V. Akleyev** – Doctor of Medical Science, Professor, Director of Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency, Chelyabinsk, Russia.

**For citation: Krestinina L.Yu., Silkin S.S., Degteva M.O., Akleyev A.V. Risk analysis of the mortality from the diseases of the circulatory system in the Ural cohort of emergency-irradiated population for the years 1950-2015. Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene, 2019, Vol. 12, No. 1, pp. 52-61. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426x-2019-12-1-52-61**

## Использование тест-объекта «контраст-деталь» для оценки возможности снижения доз облучения пациентов в цифровой рентгенографии органов грудной клетки

А.В. Водоватов

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

*Неотъемлемой частью процедуры оптимизации является оценка качества изображения, полученного с использованием новых низкодозовых протоколов. Для проведения объективной количественной оценки качества рентгеновских изображений используются специализированные тест-объекты, включающие в себя несколько модулей для одновременного проведения измерения различных физических параметров изображения (например, контраста и пространственного разрешения). Их использование позволяет установить и оценить взаимосвязь между дозой облучения пациента, параметрами проведения исследований и качеством изображения. Это особенно актуально при оптимизации проведения цифровых рентгенографических исследований, выполняющихся с автоматическим контролем экспозиции. Цель данного исследования заключалась в оценке возможностей снижения доз облучения пациентов при проведении цифровой рентгенографии органов грудной клетки с автоматическим контролем экспозиции с использованием тест-объекта «контраст-деталь». Исследование было выполнено на базе СПб ГБУЗ «Мариинская больница» на цифровом рентгеновском аппарате АРЦ-Электрон с непрямым плоскостельным детектором. Были получены рентгеновские изображения тест-объекта «контраст-деталь» в сочетании с тканезквивалентным фантомом на различных режимах проведения рентгенографии органов грудной клетки: в диапазоне напряжений 60–150 кВ с автоматическим контролем экспозиции и на фиксированном напряжении 90 кВ в диапазоне значений экспозиции 2–100 мАс. Для каждого режима измеряли произведение дозы на площадь; на его основе рассчитывали эффективную дозу. Для автоматической оценки качества рентгеновских изображений фантома было разработано программное обеспечение в среде «Mathlab». Результаты исследования показали, что переход на использование напряжения 140–150 кВ на текущих настройках автоматического контроля экспозиции приведет к снижению произведения дозы на площадь и эффективной дозы на 60% и 95% соответственно относительно стандартного протокола. Изменение текущих настроек автоматического контроля экспозиции с уменьшением значения экспозиции до 4,2 мАс с текущих 11,2 мАс для анодного напряжения в 90 кВ позволит снизить произведение дозы на площадь и эффективную дозу вплоть до трех раз по сравнению со стандартным протоколом. Параметры качества изображения для обоих случаев снизятся менее чем на 15%. Предложенные низкодозовые протоколы находятся на стадии клинической апробации в СПб ГБУЗ «Мариинская больница». Предложенная методика оценки качества изображений и разработки низкодозовых протоколов рекомендована к включению в программу обеспечения качества рентгенорадиологических исследований.*

**Ключевые слова:** медицинское облучение, контроль качества изображения, тест-объект «контраст-деталь»; пространственное разрешение, контраст, оптимизация.

### Введение

Оптимизация проведения диагностических рентгено-радиологических исследований (РРИ) заключается в на-

хождении разумного баланса между низкими уровнями облучения пациентов и необходимым качеством изображения с учетом социальных и экономических факторов<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010): Санитарные правила и нормы вы СП 2.6.1.2612-10. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. 83 с.

[Basic sanitary rules of the provision of the radiation safety (OSPORB 99/2010): Sanitary rules and norms SP2.6.1.2612-10. Moscow, Federal center of hygiene and epidemiology of Rosпотребнадзор, 2010, 83 p.]

### Водоватов Александр Валерьевич

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

Как правило, в настоящее время процесс оптимизации проведения РРИ включает следующие шаги:

- оценку (среднего, медианного) значения стандартной дозы облучения пациентов от данного РРИ;
- его сравнение с установленным референтным диагностическим уровнем (РДУ);
- в случае превышения установленного значения РДУ – проведение мероприятий по коррекции параметров проведения исследования и методик работы персонала [1].

Неотъемлемой частью процедуры оптимизации является оценка качества изображения, полученного с использованием новых низкодозовых протоколов [2–5]. При этом возможно использовать объективные и/или субъективные методы оценки качества изображения [4, 5]. Объективные методы основываются на определении и оценке физико-технических характеристик рентгеновского изображения (контраста, пространственного разрешения, шума, отношения сигнала к шуму и пр.) с использованием специализированных тест-объектов. Субъективные методы основываются на экспертной оценке врачами диагностического качества рентгеновских изображений пациентов или антропоморфных фантомов. При этом оценивается соответствие рентгеновских снимков заданным критериям качества [4–6], сравниваются рентгеновские снимки, полученные на стандартном и экспериментальных режимах [4, 5, 7] или осуществляется поиск патологий на рентгеновском снимке [4, 5, 7].

Измерение физико-технических характеристик рентгеновского изображения практически не позволяет оценить его клиническую ценность (визуализацию анатомических структур и патологий). Тем не менее, результаты таких измерений поддаются простой количественной оценке (число максимально различимых пар линий, уровень шума, не превышающий заданную величину и пр.) [8]. Напротив, количественная интерпретация результатов экспертной оценки врачами качества изображения существенно персонифицирована и требует комплексного статистического анализа. Использование однотипных тест-объектов позволяет обеспечить воспроизводимость измерений. Применение специализированного программного обеспечения для анализа изображений позволяет исключить влияние психоэмоционального состояния наблюдателя [9] и существенно сократить временные затраты на организацию и проведение оценки качества изображений [4, 9].

Наиболее распространены комбинированные тест-объекты, включающие в себя несколько модулей для одновременного проведения измерения различных физических параметров изображения (контраст+пространственное разрешение+отношение сигнала к шуму). Такие комбинированные тест-объекты применяются в рамках программ контроля качества в рентгенографии [10], маммографии [11] и компьютерной томографии [12]. Внедрение таких тест-объектов в практику отечественной лучевой диагностики и радиационной защиты в медицине существенно затруднено из-за высокой стоимости (до нескольких тысяч евро). Целесообразно разрабатывать и внедрять в практику отечественные аналоги данных тест-объектов, обладающие идентичными возможностями, но меньшей стоимостью.

Одним из наиболее актуальных направлений оценки качества изображения с использованием комбини-

рованных тест-объектов является оптимизация проведения цифровых рентгенографических исследований, выполняемых с автоматическим контролем экспозиции (АКЭ). АКЭ представляет собой систему из нескольких (от одного до трех) дозиметров – проходных ионизационных камер или твердотельных полупроводниковых детекторов, размещенных непосредственно перед приемником изображения. [13]. АКЭ позволяет автоматически отключать генератор рентгеновского аппарата при достижении детектором заданного значения дозы на приемнике рентгеновского изображения. Параметры АКЭ задаются при введении в эксплуатацию рентгеновского аппарата с учетом всех компонентов системы, участвующих в формировании рентгеновского изображения, и предпочтений медицинского персонала.

Собственные исследования [2, 3] показали значительные различия в значениях экспозиции (вплоть до 10 раз) между цифровыми рентгеновскими аппаратами отечественного и зарубежного производства при проведении рентгенографии органов грудной клетки (ОГК) с АКЭ. Целесообразно оценить потенциал снижения доз облучения пациентов при внесении изменений в настройки АКЭ (ограничения экспозиции) с одновременной оценкой физических параметров изображения для отечественных рентгеновских аппаратов и разработать низкодозовые режимы проведения рентгенографии ОГК.

**Цель исследования** – оценить возможности снижения доз облучения пациентов при проведении цифровой рентгенографии ОГК с автоматическим контролем экспозиции с использованием тест-объекта «контраст-деталь».

#### **Задачи исследования:**

- определить дозы у пациентов и параметры проведения цифровой рентгенографии ОГК с включенным АКЭ с использованием тест-объекта «контраст-деталь» и тканеэквивалентного фантома;
- оценить влияние изменения экспозиции на дозы пациентов при проведении цифровой рентгенографии ОГК с выключенным АКЭ с использованием тест-объекта «контраст-деталь» и тканеэквивалентного фантома;
- провести оценку характеристик качества рентгеновских изображений для различных режимов проведения цифровой рентгенографии ОГК;
- оценить перспективы снижения доз в цифровой рентгенографии ОГК без значимой потери в качестве изображения путем изменения настроек АКЭ;
- разработать методику проведения оптимизации проведения рентгенографических исследований с использованием тест-объекта «контраст-деталь» и разработанного программного обеспечения.

#### **Материалы и методы**

Данная работа была выполнена на цифровом рентгеновском аппарате АРЦ-Электрон (ЗАО «НИПК «Электрон»»), установленном в приемном отделении СПб ГБУЗ «Мариинская больница» [2, 3]. Данный аппарат оснащен непрямой плоскопанельным детектором (CsI+аморфный Si). Для оптимизации был выбран стандартный протокол рентгенографии ОГК в прямой передней проекции на столе (напряжение 90 кВ, расстояние

источник – приемник (РИП) – 100 см, толщина полной фильтрации – 5 мм Al, с АКЭ с активным центральным датчиком).

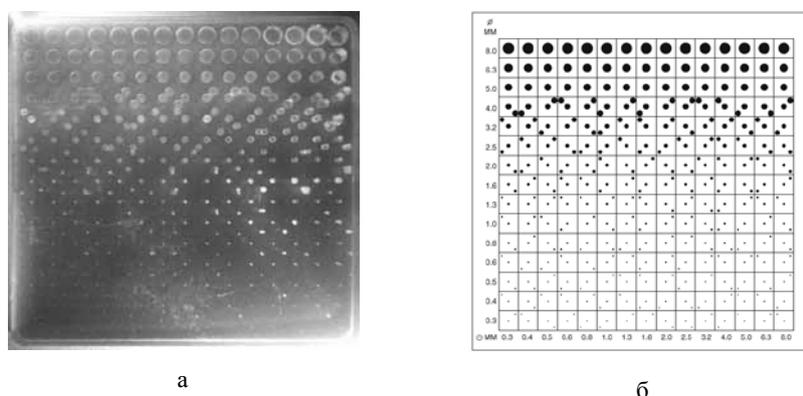
Исследование проводилось с использованием тест-объекта «контраст-деталь», представлявшим собой усовершенствованную версию фантома CDRAD 2.0 [10]. Внешний вид и схематическое изображение тест-объекта показаны на рисунке 1.

Данный тест-объект представляет собой квадратную матрицу из полиметилметакрилата (длина 150 мм, ширина 150 мм, толщина 10 мм), разделенную на 15 строк и 15 столбцов – всего 225 сегментов. В каждом сегменте матрицы просверлены отверстия с различным диаметром и глубиной. По вертикали увеличивается диаметр отверстия (с 0,3 мм до 8 мм); по горизонтали увеличивается глубина отверстия (с 0,3 мм до 8 мм), что позволяет оценивать контраст и пространственное разрешение со-

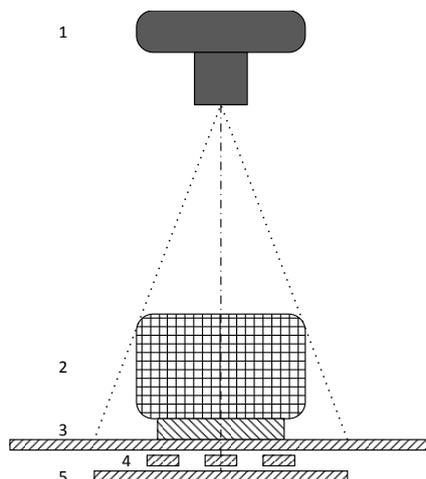
ответственно. По сравнению с оригинальным фантомом CDRAD 2.0 размеры использованного тест-объекта были уменьшены вдвое с сохранением всех размеров и паттернов расположения отверстий. Это позволяет использовать тест-объект в том числе и с коллимированными размерами полей облучения. Тест-объект был изготовлен компанией Promech Lab AB (г. Мальмо, Швеция).

В эксперименте тест-объект использовался в сочетании с тканеэквивалентным фантомом (полиэтиленовая канистра 250×250×150 мм, наполненная водой<sup>2</sup>), далее по тексту – «комплекс».

В ходе проведения эксперимента комплекс был размещен на столе рентгеновского аппарата. Рентгеновский пучок был отцентрирован по геометрическому центру тест-объекта. Был использован максимальный размер поля облучения. Схема размещения комплекса при проведении эксперимента представлена на рисунке 2.



**Рис. 1.** Внешний вид (а) и схематическое изображение (б) тест-объекта «контраст-деталь»  
**[Fig. 1.** External appearance (a) and a blueprint of the “contrast-detail” test-object]



**Рис. 2.** Схема размещения тест-объекта и тканеэквивалентного фантома в эксперименте: 1 – рентгеновская трубка; 2 – тканеэквивалентный фантом; 3 – тест-объект; 4 – детекторы АКЭ; 5 – приемник изображения  
**[Fig. 2.** Positioning of the “contrast-detail” test-object combined with the tissue-equivalent phantom: 1 – X-ray tube; 2 – tissue equivalent phantom; 3 – test-object; 4 – AEC detectors; 5 – detector]

<sup>2</sup> Методические указания МУ 2.6.1.1982-05 «Проведение радиационного контроля в рентгеновских кабинетах». Утверждены 25.04.2005 г. Доступно по адресу: <http://docs.cntd.ru/document/1200039681> Дата последнего обращения 20.01.2019 г. [Methodical guidelines MU 2.6.1.198205 “Conduction of the radiation control in the X-ray rooms”. Approved 25.04.2005. – Available from: <http://docs.cntd.ru/document/1200039681> (Accessed: 20.01.2019)]

Была проведена дозиметрия и получены рентгеновские изображения комплекса как на стандартном протоколе проведения рентгенографии ОГК с АКЭ, так и на фиксированном значении напряжения 90 кВ с ручным из-

менением значений экспозиции. Общая информация об экспериментальных режимах представлена в таблице. Все режимы подразумевали использование стандартного раstra (110 линий на дюйм, R=13:1, F=180 см).

**Параметры протоколов проведения рентгенографии ОГК, изученные в исследовании**

Таблица

**Parameters of the protocols of the radiography of the chest investigated in the current study**

[Table

Стандартный протокол с АКЭ [Standard protocol with AEC]			Экспериментальные протоколы [Test protocols]			
Напряжение на трубке, кВ [Tube voltage, kV]	РИП, см [FID, cm]	Размер поля, см×см [Size of the field, cmxcm]	Диапазон напряжений, кВ [Tube voltage range, kV]	Диапазон мАс [tube current-time product range, mAs]	РИП, см [FID, cm]	Размер поля, см×см [Size of the field, cmxcm]
90	100	40×40	60–150*	АКЭ**	100	40×40
			90	2–100	100	40×40

\* – шаг изменения напряжения – 5 кВ;

\*\* – активный центральный датчик АКЭ

[\* – Step of the tube voltage increase – 5 kV

\*\* – With the active central detector of the AEC system].

Измерение произведения дозы на площадь (ПДП) проводилось поверенной проходной ионизационной камерой ДРК-1 (ЗАО «НИПК «Доза», Россия), входящей в комплект оснащения рентгеновского аппарата. Эффективные дозы (ЭД) рассчитывались с использованием программного обеспечения РСХМС 2.0 [14] на базе измеренного ПДП для режима рентгенографии ОГК в задне-передней проекции с использованием взвешивающих коэффициентов из 60 Публикации МКРЗ [15].

Полученные цифровые рентгеновские изображения экспортировались в формате DICOM с рабочей станции рентгеновского аппарата и были сконвертированы в формат .bmp с помощью программного обеспечения ImageJ [16]. При этом изображение обрезалось по размерам тест-объекта. Конечный размер изображения составлял 555×555 пикселей. Постобработка изображения не проводилась.

Для автоматизации процесса оценки снимков было разработано программное обеспечение (ПО) в среде Matlab [17].

Метод поиска и подсчета кругов в данной программе реализован последовательно. В первую очередь изображение обрабатывается оператором Кэнни [16], выделяющим контуры изображения с помощью функции edge ('canny'). Далее с помощью функции imfill ('holes') заливается все замкнутые контуры изображения; команда imopen удаляет все незамкнутые контуры. В итоге получается бинарное изображение. Все изображение разделяется на 225 зон интереса (15×15) с помощью сетки. Функция bwboundaries в связке с функцией regionprops выдает значение диаметров различных кругов. Для каждой зоны интереса проводится операция bweuler, которая

в бинарном изображении вычисляет значение Эйлера (количество областей со значением пикселей ≠ 0). На основе этих значений выполняется построение графика, ограничивающего зону видимых кругов. Дополнительно выводятся численные значения количества кругов построчно.

Пример последовательной обработки изображений представлен на рисунке 3.

Оценка качества рентгеновских изображений тест-объекта производилась по следующим параметрам:

– определение процентного соотношения площади видимых секторов к общей площади секторов на тест-объекте (COR) [10]. Расчеты проводились с использованием выражения 1:

$$COR = \frac{\text{видимые секторы}}{\text{общая площадь секторов}} \cdot 100\% \quad (1)$$

– определение инвертированного коэффициента качества изображения [10] с использованием выражения 2:

$$IQF_{inv} = \frac{100}{\sum_{i=1}^{15} C_i \cdot D_i} \quad (2)$$

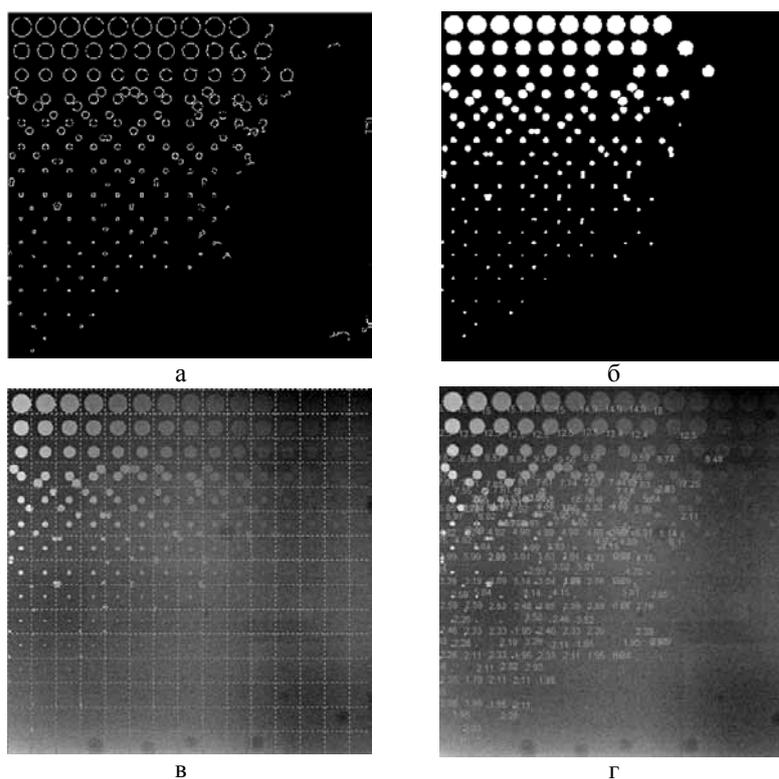
где  $D_i$  – диаметр;  $C_i$  – глубина последнего видимого отверстия в колонке  $i$ . В том случае, если не виден ни один круг, то присваивается значение 10 мм.

Различия в качестве рентгеновских изображений считались значимыми, если параметры COR и  $IQF_{inv}$  отличались более чем на 20% от аналогичных значений для текущего режима проведения рентгенографии [18].

Обработка данных выполнялась с использованием программного обеспечения Statistica 12.

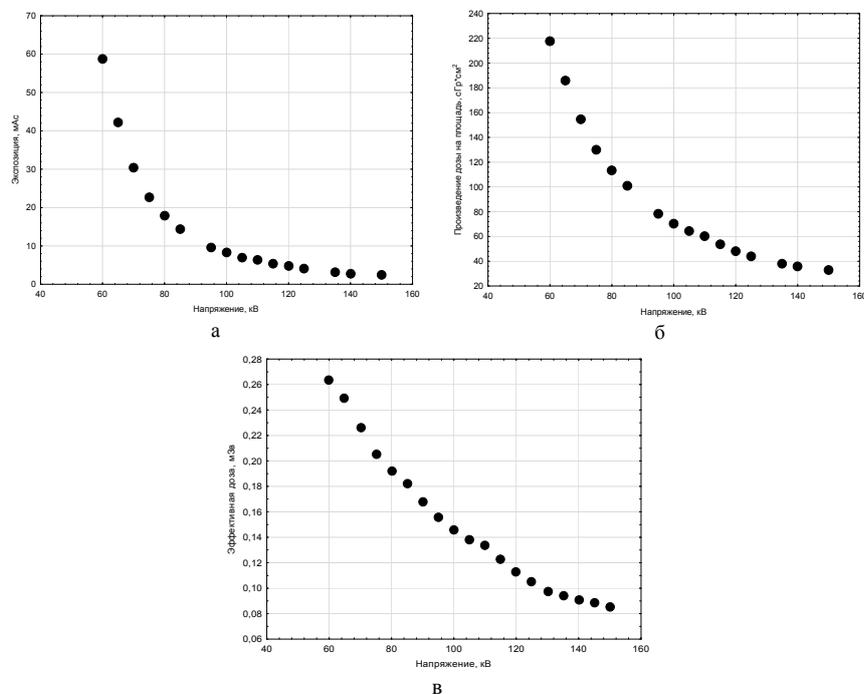
**Результаты и обсуждение**

Результаты дозиметрии комплекса с использованием АКЭ представлены на рисунке 4.



**Рис. 3.** Последовательная обработка рентгеновских изображений тест-объекта: выделение контуров на изображении оператором Кэнни (а); бинарное изображение рентгеновского снимка (б); вывод сетки, разделяющей тест-объект на сегменты (в); подсчет диаметров видимых кругов (г)

[Fig. 3. Sequential processing of the X-ray images of the test-object: contouring of the holes using Kenny operator (a), binary X-ray image (b), segmentation of the image with the grid (c), calculation of the diameters of the visible holes (d)]



**Рис. 4.** Зависимости экспозиции (а), произведения дозы на площадь (б) и эффективной дозы (в) от напряжения для аппарата АРЦ-Электрон с автоматическим контролем экспозиции

[Fig. 4. Relations between the tube current time product (a), dose-area product (b), effective dose (c) and tube voltage for the ARC-Electron X-ray unit with automated exposure control]

Результаты измерения ПДП с использованием комплекса тест-объекта «контраст-деталь» и фантома с АКЭ сопоставимы с результатами предыдущих работ, выполненных с использованием антропоморфного фантома ОГК Chest Phantom N1 «Lungman» [2, 3]. Характер изменения с включенным АКЭ идентичен результатам, представленными в [2, 3]. Различия в абсолютных значениях мАс, ПДП и ЭД объясняются различиями в толщине и плотности использованных фантомов и различиями в условиях проведения измерения. Так, измерения в данной работе проводились с активным центральным датчиком АКЭ; в [2, 3] – с активными боковыми (левым и правым). Таким образом, для проведения оптимизации возможно использовать данный комплекс при отсутствии антропоморфных фантомов.

С увеличением анодного напряжения мАс, ПДП и ЭД экспоненциально уменьшаются вплоть до выхода на плато в диапазоне напряжений 120–150 кВ (см. рис. 4). Значение экспозиции для стандартного режима проведения рентгенографии ОГК составило 11,2 мАс. Данная величина была

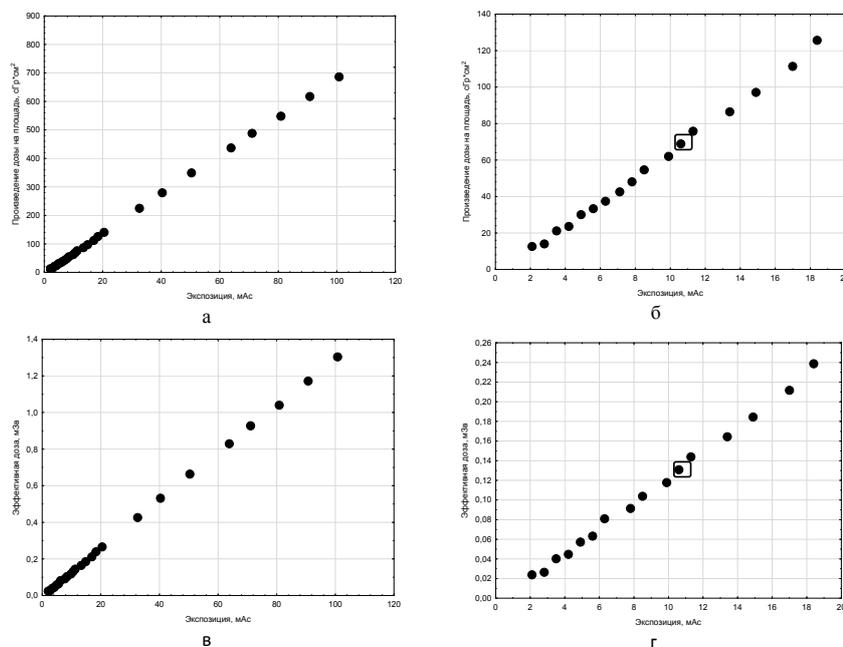
выбрана в качестве эталонной для оценки качества изображения на режимах с ручным изменением экспозиции. При использовании максимально возможного напряжения в 150 кВ снижение ПДП относительно стандартного режима проведения рентгенографии ОГК (90 кВ) составляет 62% (88,3 сГр×см<sup>2</sup> для 90 кВ, 32,9 сГр×см<sup>2</sup> для 150 кВ). Снижение ЭД относительно стандартного режима составляет 95% (0,16 мЗв для 90 кВ, 0,08 мЗв для 150 кВ).

Результаты дозиметрии комплекса на диапазоне значений экспозиции с фиксированным анодным напряжением представлены на рисунке 5.

На фиксированном анодном напряжении ПДП и ЭД линейно возрастает с увеличением мАс на всем диапазоне значений.

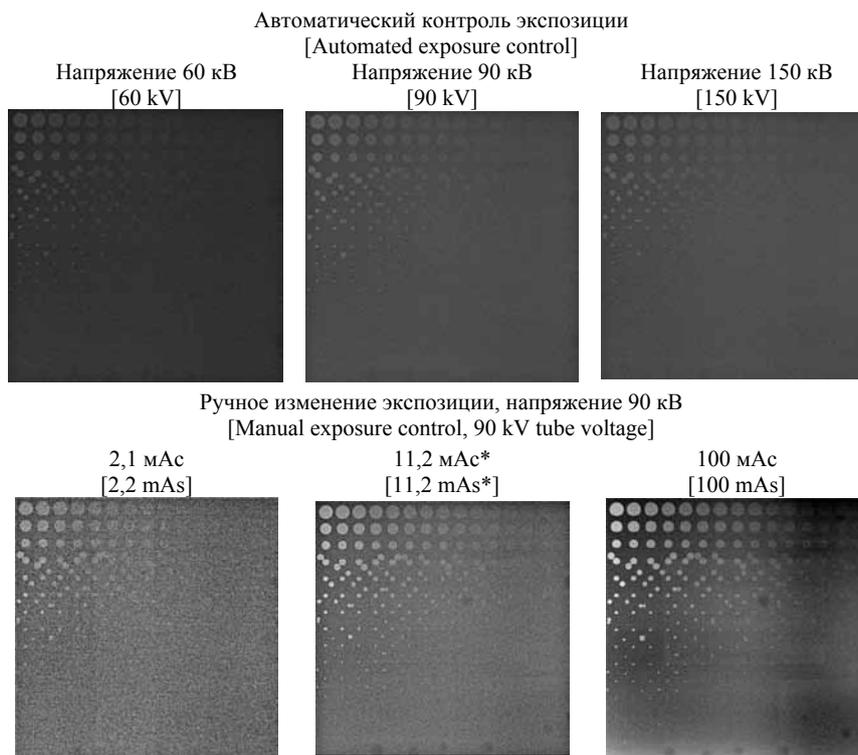
Примеры полученных рентгеновских изображений тест-объекта после экспорта в формате DICOM и конвертации в формат .bmr для режимов с АКЭ и ручным изменением экспозиции представлены на рисунке 6.

Результаты определения COR и IQF<sub>inv</sub> представлены на рисунках 7 и 8 для режимов работы с АКЭ и с ручным изменением экспозиции соответственно.



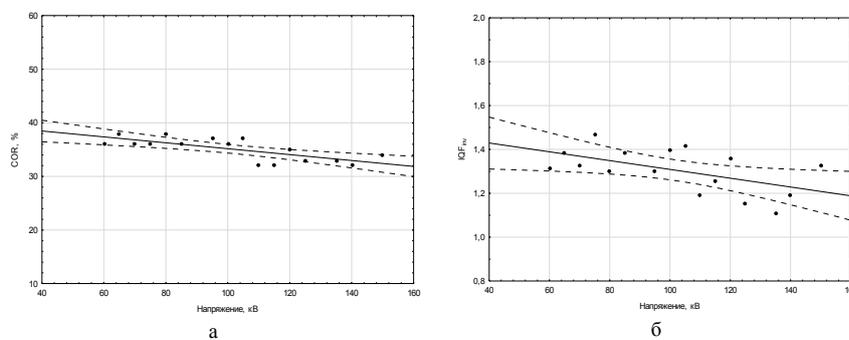
**Рис. 5.** Зависимость произведения дозы на площадь, сГр см<sup>2</sup> и эффективной дозы, мЗв, от экспозиции, мАс, на всем диапазоне значений экспозиции (а, в) и на диапазоне 2–20 мАс (б, г) соответственно. Выделено значение экспозиции для стандартного режима проведения рентгенографии ОГК

**[Fig. 5.** Relations between the dose-area product, cGy\*cm<sup>2</sup>, effective dose, mSv, and tube current-time product, mAs, for the whole range of tube current-exposure time product (a, c) and for the range of 2–20 mAs (b, d). The tube current-time product value for the standard protocol of the radiography of the chest is marked with a square]

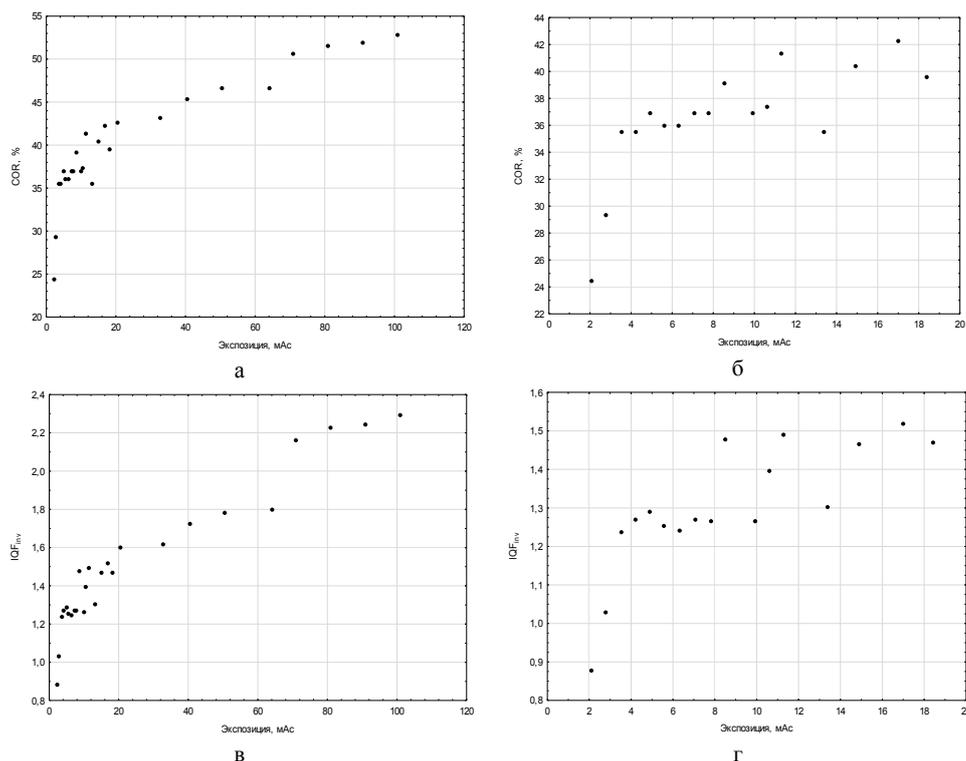


\* значение экспозиции, соответствующее порогу срабатывания системы АКЭ для 90 кВ  
\* tube current-time product, corresponding for the AEC activation for the 90 kV

**Рис. 6.** Примеры рентгеновских изображений тест-объекта, полученных на различных режимах работы рентгеновского аппарата  
[**Fig. 6.** Examples of the X-ray images of the phantom obtained on different imaging protocols]



**Рис. 7.** Зависимости COR (а) и  $IQF_{inv}$  (б) от анодного напряжения, кВ, для режима с включенным АКЭ  
[**Fig. 7.** Dependence of COR (a) and  $IQF_{inv}$  (b) on tube voltage, kV, with the AEC system on]



**Рис. 8.** Зависимости COR и IQF<sub>inv</sub> от экспозиции, мАс, для режима с ручным изменением экспозиции. Представлены результаты для всего диапазона значений экспозиции (а, в) и для диапазона 2–20 мАс (б, г) для COR и IQF<sub>inv</sub> соответственно.

Измерения выполнены на фиксированном напряжении 90 кВ

**[Fig. 8.]** Dependence of COR and IQF<sub>inv</sub> on tube current-time product, mAs, for the manual mode, for the whole range of tube-current time product (a, c) and 2–20 mAs range (b, d) respectively. Results are presented for the 90 kV tube voltage]

Результаты оценки физико-технических параметров качества рентгеновских снимков, выполненных с АКЭ, показывают, что с увеличением анодного напряжения происходит незначительное снижение качества изображения: процент видимых секторов (COR) снижается с 36% до 32%; инвертированный коэффициент качества изображения IQF<sub>inv</sub> – с 1,3 до 1,1. Данное снижение обусловлено снижением контраста изображения с увеличением анодного напряжения.

Тем не менее, постоянное выполнение рентгенографии на значениях анодного напряжения выше 120 кВ будет приводить к повышенному износу рентгеновской трубки и генератора. Также результаты аналогичных исследований [19, 20] свидетельствуют о целесообразности работы на средних значениях анодного напряжения (90 кВ), что позволяет обеспечить более качественную визуализацию анатомических структур грудной клетки и низкоконтрастных очаговых образований.

Зависимости параметров COR и IQF<sub>inv</sub> от экспозиции аппроксимируются логарифмической кривой: наблюдается рост COR с 24% до 36% и с 36% до 40% и IQF<sub>inv</sub> с 0,9 до 1,3 и с 1,3 до 1,5 на диапазонах 2–4 мАс и 4–11 мАс соответственно. На диапазоне 11–100 мАс оба параметра качества изображения значимо не меняются, прирост значений составляет в среднем 4% за каждые 10 мАс. Переход к экспозиции 4,2 мАс с текущих 11,2 мАс приведет к снижению значений COR и IQF<sub>inv</sub> на 15% за счет уменьшения пространственного разрешения и контраста (см. рис. 8). При этом ПДП снизится более чем в три

раза: с 75,8 сГр×см<sup>2</sup> до 23,6 сГр×см<sup>2</sup>; ЭД также значимо снизится с 0,14 мЗв до 0,04 мЗв. Увеличение экспозиции до 20–40 мАс не приведет к улучшению качества изображения: COR и IQF<sub>inv</sub> увеличатся менее чем на 5%; соответствующие значения ПДП составят 139,6 и 279,4 сГр×см<sup>2</sup>; ЭД – 0,26 и 0,53 мЗв соответственно. Таким образом, изменение существующих настроек АКЭ для оптимизации проведения цифровой рентгенографии ОГК оправдано только за счет снижения порога срабатывания датчиков АКЭ [21–23].

Предложенный метод оценки качества рентгеновских изображений с использованием тест-объекта «контраст-деталь» представляет собой компромисс между субъективной экспертной оценкой и оценкой отдельных физических параметров изображения (контраста, шума, пространственного разрешения и пр.). Достоинствами данного метода являются:

- простота и дешевизна. Предложенный метод может быть использован для оптимизации всех видов цифровой и аналоговой рентгенографии и флюорографии. Стоимость представленного тест-объекта при изготовлении его по чертежам не превышает 150 евро. При этом отсутствуют особые требования к организации измерений; в комплекте с тест-объектом может быть использовано то же вспомогательное оборудование, что и при проведении радиационного контроля рентгеновских кабинетов согласно МУ 2.6.1.1982-05;

- количественная оценка качества изображения. Представленные в данной работе параметры качества

изображения позволяют получить сочетанную объективную оценку контраста и пространственного разрешения;

- воспроизводимость результатов. Использование однотипных тест-объектов и программного обеспечения для анализа изображений позволяют минимизировать ошибки, связанные с человеческим фактором;

- возможность соотнести результаты оценки качества с использованием тест-объекта с видимостью реальных анатомических структур и визуализации тех или иных патологий [24].

Следует отметить, что для использования данного метода необходим доступ к системным настройкам рентгеновского аппарата для получения доступа к «сырым» (raw) рентгеновским снимкам, что невозможно без привлечения представителей организации-поставщика оборудования. В данной работе для оценки качества были использованы рентгеновские изображения, которые подверглись препроцессингу – автоматической обработке, позволяющей откорректировать контраст и шум исходных рентгеновских снимков и изменить шкалу оттенков серого в соответствии с алгоритмами, заложенными в программном обеспечении рентгеновского аппарата [13, 20, 25]. Препроцессинг не сказывается на сравнительной оценке рентгеновских снимков, полученных для одного и того же протокола (для данной работы – рентгенографии ОГК в прямой передней проекции) для одного аппарата. Однако сравнение результатов с другими протоколами или аппаратами затруднительно из-за различий в алгоритмах.

Также необходимо продолжать усовершенствование представленного программного обеспечения. Следующий этап работы будет заключаться в обеспечении возможности работы напрямую с файлами цифровых изображений в формате DICOM с автоматической сегментацией (выделением) изображения фантома, что позволит значительно ускорить процесс оценки качества изображений и устранить возможные ошибки и потерю информации, связанные с конвертированием изображений.

Целесообразно использовать следующую методику проведения оптимизации цифровой рентгенографии [21, 22]:

- определение дозовых характеристик и формирование базы рентгеновских изображений с использованием тест-объекта «контраст-деталь» и тканеэквивалентного фантома для стандартных протоколов проведения выбранного рентгенографического исследования на данном цифровом рентгеновском аппарате;

- определение дозовых характеристик и формирование базы рентгеновских изображений при изменении различных параметров проведения цифровой рентгенографии (анодного напряжения, экспозиции, толщины полной фильтрации, отказа от использования отсеивающей решетки и пр.);

- оценка качества изображения по параметрам COR и  $IQF_{inv}$ , определенным с использованием специализированного программного обеспечения;

- построение зависимостей параметров качества изображения от выбранных дозовых характеристик и параметров проведения цифровой рентгенографии;

- выбор режимов, оптимальных по соотношению качество изображения/ доза облучения пациента. При этом

параметры COR и  $IQF_{inv}$  не должны снижаться более чем на 20% по сравнению с их значениями для текущего режима проведения рентгенографии;

- клиническая апробация предложенных режимов с использованием антропоморфных фантомов или на реальных пациентах.

### Заключение

В данной работе была представлена последовательность проведения оптимизации цифровой рентгенографии, проводимой с АКЭ, с использованием комплекса, состоящего из тест-объекта «контраст-деталь» и тканеэквивалентного фантома. Использование тканеэквивалентного фантома позволяет проводить оценку качества изображения на режимах, близких к режимам, используемым для реальных пациентов. Данный комплекс позволяет проводить количественную оценку контраста и пространственного разрешения рентгеновских изображений.

Результаты дозиметрии и оценки качества изображений для рентгенографии ОГК, выполненной на аппарате АРЦ-Электрон с АКЭ, показали следующие возможности снижения доз облучения пациентов без значимой потери в качестве изображения:

- переход на использование напряжения 140–150 кВ на текущих настройках АКЭ. При этом ПДП и ЭД снижаются на 60% и 95% соответственно относительно текущего режима работы на напряжении 90 кВ; параметры качества изображения COR и  $IQF_{inv}$  – на 15%.

- изменение текущих настроек АКЭ с уменьшением значения экспозиции до 4,2 мАс с текущих 11,2 мАс для анодного напряжения в 90 кВ. Это позволит снизить ПДП и ЭД вплоть до трех раз; параметры качества изображения COR и  $IQF_{inv}$ , как и в предыдущем случае, снизятся на 15%.

Предложенные низкодозовые протоколы находятся на стадии клинической апробации в СПб ГБУЗ «Мариинская больница».

Использование тест-объекта «контраст-деталь» целесообразно для грубой оптимизации протоколов проведения рентгенографических исследований: оценки текущих доз облучения пациентов и характеристик изображения и определения потенциальных низкодозовых режимов, на которых обеспечивается снижение доз облучения без значимого снижения контраста и пространственного разрешения. В качестве следующего этапа необходимо апробировать предложенные низкодозовые протоколы с использованием антропоморфных фантомов или реальных пациентов. При этом необходима экспертная оценка качества изображения. Предложенная методика проведения оптимизации может быть реализована в рамках программы обеспечения качества рентгенорадиологических исследований.

### Благодарности

Автор выражает свою благодарность Голикову Владиславу Юрьевичу (ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева) за помощь в анализе и обработке данных и Тельновой Анне Юрьевне (Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН) за помощь в разработке программного обеспечения, а также персоналу отделения лучевой диагностики Мариинской больницы.

Литература

1. Водоватов, А.В. Практическая реализация концепции референтных диагностических уровней для оптимизации защиты пациентов при проведении стандартных рентгенографических исследований / А.В. Водоватов // Радиационная гигиена. – 2017. Т. 10, № 1. – С. 47–55.
2. Vodovатов A.V., Drozdov A.A., Telnova A.Yu., Bernhardsson C. Management of patient doses from digital X-ray chest screening examinations. *Rad. Prot. Dosim.*, 2016, Vol. 169, № 1-4, pp. 232-239.
3. Камышанская, И.Г. Перспективы снижения дозовой нагрузки на пациентов в профилактической цифровой рентгенографии органов грудной клетки / И.Г. Камышанская, В.М. Черемисин, А.В. Водоватов // Вестник рентгенологии и радиологии. – 2018. – № 99(1). – С. 30–42. – DOI:10.20862/0042-4676-2018-99-1-30-42
4. ICRU Publication 54. Medical imaging – the assessment of image quality. International Commission on Radiation Units and Measurements. Bethesda, 1995. - 88 p.
5. ICRU Publication 70. Image quality in chest radiography. Journal of ICRU. – Nuclear Technology Publishing, Ashford, 2003, 129 p.
6. Vodovатов A.V., Kamyshanskaya I.G., Drozdov A.A., Bernhardsson C. Quality assessment of digital X-ray chest images using an anthropomorphic chest phantom. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2017, Vol. 808, doi:10.1088/1742-6596/808/1/012009
7. Good W.F., Gur D., Feist J.H., Thaete F.L., [et. al.] Subjective and objective assessment of image quality – a comparison. *J. Digit. Imaging*, 1994, Vol. 7, № 2, pp. 77–78.
8. Aichinger H. Radiation exposure and image quality in x-ray diagnostic radiology: physical principles and clinical applications. Heidelberg ; New York: Springer, 2012. 2nd ed – XIV, 307 p.
9. DeWerd L.A., Kissick M. The phantoms of medical and health physics: devices for research and development. New York: Springer, 2014, 286 p.
10. Contrast-detail phantom ARTINIS CDRAD type 2.0. Manual. Онлайн-ресурс: [https://www.radiograf.dk/fileadmin/user\\_upload/dokumenter/Bacheloropgaver/Billedkvalitet\\_ved\\_CR\\_og\\_DR\\_-\\_et\\_fantomforsog/CR\\_og\\_DR\\_Bilag\\_C.pdf](https://www.radiograf.dk/fileadmin/user_upload/dokumenter/Bacheloropgaver/Billedkvalitet_ved_CR_og_DR_-_et_fantomforsog/CR_og_DR_Bilag_C.pdf) (Дата обращения: 20.01.2019).
11. CDMAM 4.0. Онлайн-ресурс: <https://www.artinis.com/cdmam-40/> (Дата обращения: 20.01.2019).
12. ACR CT Accreditation phantom 464. Онлайн-ресурс: [https://www.sunuclear.com/documents/datasheets/gammex/gammex\\_list/ACR\\_464\\_D062615.pdf](https://www.sunuclear.com/documents/datasheets/gammex/gammex_list/ACR_464_D062615.pdf) (Дата обращения: 20.01.2019).
13. Dance D.R., Chrostofides S., Maidment A.D.A., McJean I.D., Ng K. H. Diagnostic radiology physics: A Handbook for teachers and students. Techn. Ed. Vienna, IAEA, 2014.
14. Tapiovaara M., Siiskonen T. PCXMC 2.0. User's Guide. S teilyturvakeskus. Tekniset raportit. STUK–TR 7. Helsinki 2008, 24 p.
15. 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.
16. National Institute of Health. ImageJ – image processing and analysis in Java. Онлайн-ресурс: <http://www.rsbl.info.nih.gov/ij/> (Дата обращения: 20.01.2019).
17. Потемкин, В.Г. Справочник по MATLAB / В.Г. Потемкин. – М.: Интернет, 2012. – 675 с.
18. Irvine M.A. Image Quality and Radiation Dose Comparison of a Computed Radiography System and an Amorphous Silicon Flat Panel System in Paediatric Radiography: A Phantom Study. Master thesis.: <https://researchbank.rmit.edu.au/eserv/rmit:7880/Irvine.pdf> (Дата обращения: 20.01.2019).
19. Uffman M., Neitzel U., Prokop M. [et. al.] Flat-Panel-detector chest radiography: effect of tube voltage on image quality. *Radiology*, 2005, Vol. 235, pp. 642-650.
20. Shrimpton P.C., Jones D.G., Wall B.F. The influence of tube filtration and potential on patient dose during x-ray examinations. *Phys. Med. Biol.*, 1988, Vol. 33, № 10, pp. 1205–1212.
21. Jones A.K. Calibrating automatic exposure control for digital radiography. AAPM, 2009.
22. Jones A.K., Anderso M.D. Using automatic exposure control in digital radiography. AAPM Meeting, 2008, 10 p.
23. Doyle P., Martin C.J. Calibrating automatic exposure control devices for digital radiography. *Phys. Med. Biol.*, 2006, Vol. 51, № 21, pp. 5475–5485.
24. Al-Murshedi, S., Hogg, P., & England, A. An investigation into the validity of utilising the CDRAD 2.0 phantom for optimisation studies in digital radiography. *Brit. Journ. of Rad.*, 2018 doi:10.1259/bjr.20180317
25. Marshall N.W. An examination of automatic exposure control regimes for two digital radiography systems. *Phys. Med. Biol.*, 2009, Vol. 54, № 15, pp. 4645–4670.

Поступила: 21.01.2019 г.

**Водоватов Александр Валерьевич** – заведующий лабораторией радиационной гигиены медицинских организаций, ведущий научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: vodovatofff@gmail.com

**Для цитирования:** Водоватов А.В. Использование тест-объекта «контраст-деталь» для оценки возможности снижения доз облучения пациентов в цифровой рентгенографии органов грудной клетки // Радиационная гигиена. – 2019. – Т. 12, № 1. – С. 62-73. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-62-73

## Evaluation of the dose reduction capabilities in digital radiography of the chest using contrast-detail phantom

Aleksandr V. Vodovatov

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

*Assessment of the quality of the images obtained using optimized (low-dose) protocols is the inherent part of the optimization in X-ray diagnostics. To perform the objective quantitative image quality assessment one can use dedicated test-objects, including several components for the simultaneous measurement of the different physical image characteristics (contrast and spatial resolution). The use of such test objects allows estimating and assessing the relations between the patient dose, parameter of the X-ray examination and image quality. That is especially important for the optimization of the digital radiographic examinations performed with automated exposure control. The aim of the current study was to evaluate the possibilities of the patient dose reduction using "contrast-detail" test-object for the digital radiography of the chest in posterior-anterior projection performed with automated exposure control. The study was performed in St-Petersburg Mariinsky hospital on a digital X-ray unit "ARC-Electron" with a flat-panel detector. The combination of a test-object and a tissue-equivalent phantom were imaged on a range of chest X-ray protocols: on a 60–150 kV tube voltage range with automated exposure control; and using fixed 90 kV tube voltage on a range of 2–100 mAs tube current-exposure time product. Dose-area product (cGy cm<sup>2</sup>) was measured for each exposure; effective dose (mSv) was estimated for each exposure based on dose-area product. A dedicated software was developed for the automated image quality assessment. The results of the study indicate that the use of a high tube voltage (140–150 kV) with current automated exposure control settings would lead to 60% and 95% reduction of the dose-area product and effective dose, respectively, compared to the standard protocol. The adjustment of the current automated exposure control settings with the reduction of the tube current-exposure time product from 11,2 mAs to the 4,2 mAs for the tube voltage of 90 kV would lead to the reduction of both the dose-area product and effective dose up to a factor of three, compared to the standard protocol. For both scenarios image quality characteristics decreased by less than 15%. The proposed low-dose protocols are under the clinical approbation at Mariinsky hospital. The proposed method of image quality assessment and development of low-dose protocols is recommended for inclusion in the quality assurance program for the radiography examinations.*

**Key words:** medical exposure, image quality assessment, contrast-detail test-object, spatial resolution, contrast, optimization.

### References

- Vodovatov A.V. Practical implementation of the diagnostic reference levels concept for the common radiographic examinations. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(1):47-55. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-1-47-55>
- Vodovatov A.V., Drozdov A.A., Telnova A.Yu., Bernhardsson C. Management of patient doses from digital X-ray chest screening examinations. *Rad. Prot. Dosim.*, 2016, Vol. 169, № 1-4, pp. 232-239.
- Kamyshanskaya I.G., Cheremisin V.M., Vodovatov A.V. Prospects for lowering doses during preventive digital chest radiography. *Vestnik rentgenologii i radiologii = Journal of radiology and nuclear medicine*. 2018;99(1):30-42. (In Russian) <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2018-99-1-30-42>
- ICRU Publication 54. Medical imaging – the assessment of image quality. International Commission on Radiation Units and Measurements. Bethesda, 1995, 88 p.
- ICRU Publication 70. Image quality in chest radiography. Journal of ICRU. – Nuclear Technology Publishing, Ashford, 2003, 129 p.
- Vodovatov A.V., Kamyshanskaya I.G., Drozdov A.A., Bernhardsson C. Quality assessment of digital X-ray chest images using an anthropomorphic chest phantom. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2017, Vol. 808, doi:10.1088/1742-6596/808/1/012009
- Good W.F., Gur D., Feist J.H., Thaete F.L., [et. al.] Subjective and objective assessment of image quality – a comparison. *J. Digit. Imaging*, 1994, Vol. 7, № 2, pp. 77–78.
- Aichinger H. Radiation exposure and image quality in x-ray diagnostic radiology: physical principles and clinical applications. Heidelberg ; New York: Springer, 2012. 2nd ed – XIV, 307 p.
- DeWerd L.A., Kissick M. The phantoms of medical and health physics: devices for research and development. New York: Springer, 2014, 286 p.
- Contrast-detail phantom ARTINIS CDRAD type 2.0. Manual. – Available on: [https://www.radiograf.dk/fileadmin/user\\_upload/dokumenter/Bacheloropgaver/Billedkvalitet\\_ved\\_CR\\_og\\_DR\\_-\\_et\\_fantomforsoeg/CR\\_og\\_DR\\_Bilag\\_C.pdf](https://www.radiograf.dk/fileadmin/user_upload/dokumenter/Bacheloropgaver/Billedkvalitet_ved_CR_og_DR_-_et_fantomforsoeg/CR_og_DR_Bilag_C.pdf) (Accessed: 20.01.2019).
- CDMAM 4.0. – Available on: <https://www.artinis.com/cdmam-40/> (Accessed: 20.01.2019).
- ACR CT Accreditation phantom 464. – Available on: [https://www.sunuclear.com/documents/datasheets/gammex/gammex\\_list/ACR\\_464\\_D062615.pdf](https://www.sunuclear.com/documents/datasheets/gammex/gammex_list/ACR_464_D062615.pdf) (Accessed: 20.01.2019).

**Aleksandr V. Vodovatov**

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

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

13. Dance D.R., Chrostofides S., Maidment A.D.A., McJean I.D., Ng K.H. Diagnostic radiology physics: A Handbook for teachers and students. Techn. Ed. Vienna, IAEA, 2014.
14. Tapiovaara M., Siiskonen T. PCXMC 2.0. User's Guide. Säteilyturvakeskus. Tekniset raportit. STUK-TR 7. Helsinki 2008, 24 p.
15. ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: translation from English. Edited by M.F. Kiselev, N.K. Shandala. Moscow, «Alana», 2009, 312 p. (In Russian)
16. National Institute of Health. ImageJ – image processing and analysis in Java. – Available on: <http://www.rsbi.info.nih.gov/ij/> (Accessed: 20.01.2019).
17. Potemkin V.G. Matlab handbook. Moscow, Internet, 2012, 675 p. (In Russian).
18. Irvine M.A. Image Quality and Radiation Dose Comparison of a Computed Radiography System and an Amorphous Silicon Flat Panel System in Paediatric Radiography: A Phantom Study. Master thesis. – Available on: <https://researchbank.rmit.edu.au/eserv/rmit:7880/Irvine.pdf> (Accessed: 20.01.2019).
19. Uffman M., Neitzel U., Prokop M. [et. al.] Flat-Panel-detector chest radiography: effect of tube voltage on image quality. Radiology, 2005, Vol. 235, pp. 642-650.
20. Shrimpton P.C., Jones D.G., Wall B.F. The influence of tube filtration and potential on patient dose during x-ray examinations. Phys. Med. Biol., 1988, Vol. 33, № 10, pp. 1205–1212.
21. Jones A.K. Calibrating automatic exposure control for digital radiography. AAPM, 2009.
22. Jones A.K., Anderson M.D. Using automatic exposure control in digital radiography. AAPM Meeting, 2008, 10 p.
23. Doyle P., Martin C.J. Calibrating automatic exposure control devices for digital radiography. Phys. Med. Biol., 2006, Vol. 51, № 21, pp. 5475–5485.
24. Al-Murshedi, S., Hogg, P., & England, A. An investigation into the validity of utilising the CDRAD 2.0 phantom for optimisation studies in digital radiography. Brit. Journ. of Rad., 2018 doi:10.1259/bjr.20180317
25. Marshall N.W. An examination of automatic exposure control regimes for two digital radiography systems. Phys. Med. Biol., 2009, Vol. 54, № 15, pp. 4645–4670.

Received: January 21, 2019

**For correspondence: Aleksandr V. Vodovatov** – Head of Protection Laboratory, Leading Researcher, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Mira str., 8, St. Petersburg, 197101, Russia; E-mail: vodovatoff@gmail.com)

**For citation: Vodovatov A.V. Evaluation of the dose reduction capabilities in digital radiography of the chest using contrast-detail phantom. Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene, 2019, Vol. 12, No. 1, pp.62-73. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-62-73**

## Модель риск–коммуникации с населением по вопросам радиационной безопасности и проведение на её основе научных исследований

А.М. Библин

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 обоснование и разработка модели риск-коммуникации с населением по вопросам радиационной безопасности и проведение на её основе научных исследований в Санкт-Петербурге и Ленинградской области. В предлагаемой модели риск-коммуникации выделены пять последовательно и циклично сменяющихся друг друга этапов: 1) научные исследования; 2) научно обоснованная система практических мероприятий; 3) региональная программа ведения риск-коммуникации по вопросам радиационной безопасности населения; 4) практические мероприятия по реализации программы; 5) научные исследования по оценке эффективности ведения риск-коммуникации. Были выделены 4 блока вопросов, на которые нужно дать ответ в рамках научных исследований: 1) характеристика радиационно-гигиенической обстановки; 2) демографическая ситуация и состояние здоровья населения; 3) установки участников информационного поля о риске; 4) характеристика информационного поля. Результаты, полученные в ходе исследований, позволяют в процессе обоснования системы практических мероприятий: 1) определить направления риск-коммуникации; 2) оценить необходимость разработки локальных программ в рамках региональных; 3) оценить уровень знаний и представлений населения о возможных источниках радиационного риска; 4) определить заинтересованные стороны при ведении риск-коммуникации; 5) определить виды и перечень информационных материалов и информационных ресурсов, оптимальных для различных групп населения. Проведенные исследования показывают, что радиационная обстановка в Санкт-Петербурге и Ленинградской области является стабильной. При этом в этих регионах существуют все ситуации облучения, которые требуют разработки локальных программ. Для населения Санкт-Петербурга и Ленинградской области выявлены различия в показателях здоровья населения. Знания населения по вопросам радиационной безопасности могут быть охарактеризованы как фрагментарные и неуверенные. Предпочтительным источником информации для населения является Интернет. Безусловными лидерами по уровню доверия населения являются сотрудники МЧС, ученые и специалисты. Больше половины респондентов в Санкт-Петербурге и Ленинградской области (73% и 60% соответственно) не слышали о ключевых общественных организациях, освещающих вопросы радиационной безопасности населения, что указывает на достаточно низкую эффективность активности этих общественных организаций. Как по всем, так и по отдельным категориям СМИ, значительную часть (более 50%) составляют публикации с нейтральным характером представления информации. Только для СМИ города Сосновый Бор характерно активное привлечение специалистов по вопросам радиационной безопасности населения при подготовке информационных материалов.*

**Ключевые слова:** риск-коммуникация, информирование о риске, радиационная безопасность, дозы облучения, социологическое исследование, население.

### Введение

Обеспечение населения достоверной информацией о санитарно-эпидемиологической обстановке и о мерах по обеспечению санитарно-эпидемиологического благопо-

лучия населения входит в функциональные обязанности Роспотребнадзора<sup>1</sup>. Необходимость информирования отдельных групп населения о радиационном риске установлена в НРБ 99/2009 [1].

<sup>1</sup> ФЗ № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения», Положение о федеральной службе по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. [Federal Law No. 52-FZ «On Sanitary and Epidemiological Wellbeing of the Public», Statement on the Federal Service for the Supervision of Consumer Rights Protection and Human Wellbeing]

**Библин Артём Михайлович**

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

**Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: a.biblin@niirg.ru

В анализе риска здоровью, являющегося основой риск-ориентированного подхода к осуществлению контрольно-надзорной деятельности, обязательным элементом, наряду с оценкой риска и управлением риском, является риск-коммуникация (в отечественной практике в качестве синонима чаще используется термин «информирование о риске») [2, 3]. В настоящее время в Российской Федерации методическое обеспечение риск-коммуникации отсутствует.

В последние годы в связи с гармонизацией санитарного законодательства России с международными нормами, внедрением методологии оценки риска здоровью в практику Роспотребнадзора стали появляться отечественные научные работы, касающиеся непосредственно ведения риск-коммуникации [4, 5]. Однако в данных работах вопросы риск-коммуникации при обеспечении радиационной безопасности населения (РБ) практически не затрагиваются.

Авария на японской АЭС «Фукусима-1» в 2011 г. в очередной раз привлекла внимание к проблеме коммуникации с населением и другими заинтересованными сторонами по вопросам РБ как за рубежом, так и в Российской Федерации [6–9]. Несмотря на активную информационную работу специалистов Роспотребнадзора с населением, исследования показали недостаточную эффективность информирования населения по вопросам РБ, а также отсутствие единой программы информационной работы с населением, учитывающей различия в восприятии радиационного риска при возможных сценариях облучения [10].

С развитием научного знания произошло изменение подходов от однонаправленного информирования со стороны государства к интерактивному процессу обмена информацией и мнениями о рисках между специалистами, лицами, принимающими управленческие решения, средствами массовой информации, заинтересованными группами и широкой общественностью с постоянной, а не от аварии к аварии, риск-коммуникацией в области обеспечения РБ [11].

Таким образом, в настоящее время в Российской Федерации не разработана современная научно обоснованная модель риск-коммуникации по вопросам РБ и не сформулированы требования к проведению научных исследований при риск-коммуникации.

**Цель исследования** – обоснование и разработка модели риск-коммуникации с населением по вопросам радиационной безопасности и проведение на её основе научных исследований в Санкт-Петербурге (СПб) и Ленинградской области (ЛО).

#### Задачи исследования

1. Предложить модель риск-коммуникации по вопросам РБ.
2. Дать гигиеническую оценку радиационной обстановке (РО) на территории СПб и ЛО.
3. Проанализировать демографическую ситуацию и состояние здоровья населения СПб и ЛО.
4. Изучить информационное поле СПб и ЛО по вопросам РБ.
5. Исследовать установки населения по вопросам РБ.

#### Материалы и методы

Предлагаемая в статье модель является оригинальной, разработанной с учетом анализа существующих литературных данных [2–11].

В качестве исследуемых регионов были выбраны СПб и ЛО. ЛО характеризуется наличием на её территории различных источников риска: Ленинградская АЭС и пять иных объектов, использующих источники ионизирующего излучения, 1–2 категории опасности; территории, пострадавшие в результате аварии на ЧАЭС; радиоопасные территории. СПб был выбран как близкий к Ленинградской АЭС (около 70 км от центра города) мегаполис (5,2 млн человек) со значительным количеством предприятий атомной отрасли и организаций, эксплуатирующих источники ионизирующего излучения (ИИИ) различного назначения.

Наиболее полная информация о состоянии радиационной обстановки и дозах облучения населения от различных ИИИ в субъектах РФ содержится в радиационно-гигиенических паспортах территорий (РГП) и в отчетных формах единой государственной системы контроля индивидуальных доз облучения граждан (ЕСКИД). В ходе исследования проведен анализ вышеуказанных источников за период с 2012 по 2016 г. [12–21].

Для анализа демографической ситуации и состояния здоровья населения в качестве источников информации были выбраны данные официальных статистических сборников Петростата, серии ежегодников «Злокачественные новообразования в России», материалов ФГБУ «НИИ онкологии им. Н.Н. Петрова» [22–29]. Данные анализировались за период с 2012 по 2016 г.

Анализировались следующие медико-демографические показатели:

- численность населения;
- продолжительность жизни;
- общая смертность;
- общая заболеваемость;
- онкологическая заболеваемость и смертность в субъекте РФ;
- частота наследственных эффектов в субъекте РФ.

В ходе исследования была дана сравнительная характеристика онкологической заболеваемости, смертности и наследственных эффектов в СПб и ЛО с соответствующими показателями по Российской Федерации.

В 2016 г. было проведено социологическое исследование установок взрослого населения СПб и ЛО с целью анализа состояния массового сознания, касающегося вопросов РБ и смежных с ней тем. Для исследования была разработана анкета, состоящая из 49 вопросов. Использован метод массового опроса по месту жительства. Методика – очное стандартизированное интервью с предъявлением респонденту стимульных материалов (карточек с перечнями вариантов ответа). Выборочная совокупность стратифицирована по административным районам СПб и ЛО. Исследованием охвачены все административно-территориальные единицы обоих субъектов федерации (муниципальные районы). Отбор респондентов производился по маршрутной методике с контролем наполнения демографических квот.

Всего опрошено 2369 респондентов, из них в СПб – 1006, в ЛО – 1363, в том числе в г. Сосновый Бор – 401. Размер случайной ошибки для выборки в целом составлял

ет не более 2,1% для доверительной вероятности 95,4%. Случайные ошибки подвыборок по субъектам федерации не превышают для СПб 3,2%, для ЛО – 2,7% для указанно-го значения доверительной вероятности.

Различия между выборками определялись с использованием критерия  $\chi^2$  Пирсона. Различия считались достоверными с  $p < 0,05$ .

Для анализа информационного поля было выбрано 26 СМИ, которые можно разделить на три категории: печатные СМИ – 8 газет, 2 из которых распространяются только в г. Сосновый Бор; 8 телеканалов (4 федеральных; 2 региональных и 2 телеканала г. Сосновый Бор); 10 сетевых СМИ. Отбирались печатные издания с наибольшим тиражом, телеканалы с наибольшими значениями среднесуточных долей в процентах востребованного населением вещания, основной тематической направленностью которых является информирование населения о событиях федерального, областного, городского и локального масштаба, включая и исследуемую тематику. Как дополнительные критерии для выбора исследуемых СМИ были определены издания с наиболее высоким в регионе индексом цитируемости (качественный показатель, который учитывает количество ссылок на материалы СМИ, влияние цитирующих ресурсов и не учитывает самцитирование). В итоге были определены СМИ, являющиеся наиболее важными с точки зрения трансляции населению информации, включая вопросы РБ и развития атомной отрасли.

В качестве объекта исследования были выбраны публикации в газетах и сетевых СМИ, касающиеся вопросов РБ и опубликованные в 1–3 кварталах 2016 г. Материалы изданий исследовались по количественным и качественным параметрам, включая частоту, жанр публикаций и их распределение по различным СМИ, а также характеру представления материала (позитивный, негативный или нейтральный).

В ходе исследования проанализированы данные о 272 различных общественных организациях (ОО), осуществляющих свою деятельность на территориях СПб и ЛО. Были выделены ОО, сфера деятельности которых включает вопросы развития атомной отрасли и информирования населения о вопросах РБ. Социологическое исследование позволило определить значимые ОО, которые в ходе опроса набрали количество упоминаний, превышающее стандартную ошибку для региона. Для значимых ОО проводился качественный и количественный анализ активности в Интернете.

Для учета, анализа и хранения информационных материалов были разработаны автоматизированные системы по анализу публикаций СМИ и ОО, доступные как web-приложение.

### Результаты и обсуждение

В статье предлагается оригинальная модель риск-коммуникации по вопросам РБ. Модель описывает пять последовательно и циклично сменяющих друг друга этапов:

- 1) научные исследования;
- 2) научно обоснованная система практических мероприятий;
- 3) региональная программа ведения риск-коммуникации по вопросам РБ;

4) практические мероприятия по реализации программы;

5) научные исследования по оценке эффективности ведения риск-коммуникации.

Можно выделить 4 блока вопросов, на которые нужно дать ответ в рамках научных исследований:

– объективная характеристика источников риска: состояние радиационной обстановки, дозы облучения, риски для здоровья;

– демографическая ситуация и состояние здоровья населения;

– установки участников информационно поля о риске;

– характеристика информационного поля.

Результаты, полученные в ходе исследований, позволяют в процессе обоснования системы практических мероприятий:

– определить направления риск-коммуникации, оценить необходимость разработки локальных программ в рамках региональных;

– оценить уровень знаний и представлений населения о возможных источниках радиационного риска;

– определить заинтересованные стороны («стейкхолдеров») при ведении риск-коммуникации;

– определить виды и перечень информационных материалов и информационных ресурсов, наиболее оптимальных для ведения эффективной риск-коммуникации с различными группами населения.

Организационной основой риск-коммуникации по вопросам РБ является региональная программа.

Она разрабатывается на основе результатов, полученных в ходе научных исследований и научно обоснованной системы практических мероприятий, должна содержать конкретные виды эпизодической и постоянной информационной работы с различными группами населения, перечень населенных пунктов, требующих разработки локальных программ, перечень информационных материалов и источников информации, план проведения мероприятий.

Этап реализации практических мероприятий заключается в активизации и подключении традиционных и электронных СМИ, социальных сетей к распространению подготовленных информационных материалов и в установлении/поддержании прямых контактов специалистов с различными заинтересованными сторонами.

Заключительный этап цикла состоит в оценке эффективности осуществляемых мероприятий, в проведении дополнительных исследований, позволяющих сделать вывод о достижении целей риск-коммуникации либо о выявлении недостатков для последующей коррекции.

Акцент на учете региональной специфики при организации риск-коммуникации вызван существованием региональных особенностей таких социально значимых факторов, как состояние здоровья населения, радиационная обстановка, информационное поле.

Научные исследования в соответствии с предложенной моделью выполнены в СПб и ЛО.

#### *Анализ радиационно-гигиенической обстановки*

Неадекватное восприятие радиационного риска населением может быть связано в том числе с низким уровнем информированности о существующих объектах, эксплуатирующих ИИ, дозах облучения населения и состоянии

радиационной обстановки в регионе. Без использования фактических данных невозможна информационная работа с населением и оценка адекватности восприятия населением радиационного риска. Ниже приведен пример подбора такой информации для СПб и ЛО.

Радиационно-гигиеническая обстановка на территории СПб и ЛО в 2012–2016 гг. оставалась стабильной. Уровни радиоактивного загрязнения объектов внешней среды не превышали требований, установленных нормативными и правовыми актами в области обеспечения РБ.

За оцениваемый период мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения в воздухе на территории СПб находилась в пределах 0,09–0,18 мкЗв/ч (в среднем 0,12 мкЗв/ч), что соответствует многолетним среднегодовым значениям данного показателя в СПб.

На протяжении 2012–2016 гг. в СПб отмечен постоянный рост использования ИИИ (табл. 1). Объекты 1–2 категории опасности отсутствовали на территории СПб на протяжении всего исследуемого периода времени. Рост количества организаций, использующих ИИИ, происходил за счет стоматологических рентгеновских аппаратов. В ЛО количество организаций, эксплуатирующих ИИИ, и установок с ИИИ увеличилось незначительно, что может быть связано с экономической ситуацией в регионе. При этом на территории ЛО функционируют два объекта пер-

вой категории опасности и четыре объекта второй (см. табл. 1).

Средняя индивидуальная годовая эффективная доза облучения населения СПб за счет всех источников в исследуемые годы варьировала незначительно и находилась в пределах 3,83–4,02 мЗв в год (табл. 2). 84% суммарной дозы облучения населения за исследуемый период обусловлены природными источниками излучения и 16% – медицинскими рентгенорадиологическими диагностическими исследованиями. На долю остальных источников (использование ИИИ и техногенный фон) приходится менее 1%.

Средняя индивидуальная годовая эффективная доза облучения населения за счет всех источников ЛО также варьировала незначительно и находилась в пределах 3,27–3,37 мЗв в год (см. табл. 2). При этом 92% суммарной дозы облучения населения за исследуемый период обусловлены природными источниками излучения и 7% – медицинскими рентгенорадиологическими диагностическими исследованиями. На долю остальных источников (использование ИИИ и техногенный фон) приходится менее 1%.

По данным радиационно-гигиенического паспорта СПб, на территории юго-западной части города существуют участки с повышенным радоновыделением с по-

Распределение количества организаций и установок с ИИИ в 2012–2016 гг.

Таблица 1

Distribution of the number of organizations and installations with ionizing radiation sources in 2012–2016]

[Table 1

Год [Year]	2012	2013	2014	2015	2016
Санкт-Петербург [St. Petersburg]					
Количество организаций [Number of organizations]	771	811	870	916	955
Количество установок с ИИИ [Number of installation]	4832	4983	5329	5393	5743
Ленинградская область [Leningrad region]					
Количество организаций [Number of organizations]	158	164	159	164	180
Количество установок с ИИИ [Number of installation]	3751	3724	3766	3757	3825

Среднегодовая эффективная доза облучения на жителя СПб, ЛО и Российской Федерации за 2011–2016 гг.

Таблица 2

The average annual effective dose per inhabitant of St. Petersburg, Leningrad region and the Russian Federation for 2011–2016]

[Table 2

Регион [Region]	Год [Year]	2012	2013	2014	2015	2016	Среднее за 2012–2016 гг. [Average for 2012–2016]
Санкт-Петербург [St-Petersburg]		3,89	3,87	3,83	3,94	4,02	3,91
Ленинградская область [Leningrad region]		3,36	3,37	3,37	3,36	3,27	3,35
Российская Федерация [Russian Federation]		3,90	3,80	3,70	3,81	3,76	3,79

верхности грунта, связанные с приповерхностными рудопроявлениями диктионемовых сланцев. Радоноопасные участки на территории города имеют площадь до 0,5–1,0 га в пригородах на юго-западе СПб.

По данным радиационно-гигиенического паспорта ЛО, на территории региона выделяют девять радоноопасных территорий общей площадью около 19 000 км<sup>2</sup>. Наиболее неблагоприятной в отношении радона является полоса (площадью 788 км<sup>2</sup>) ордовикского глинта и прилегающая к ней территория общей площадью около 1000 км<sup>2</sup>. Всего в пределах ЛО выявлено 20 радоноопасных объектов площадью от 100 до 3275 км<sup>2</sup>, общей площадью 18825 км<sup>2</sup>, что составляет 25,8% от площади суши ЛО.

В 2016 г. в 31,2% проб от общего числа исследованных подземных источников водоснабжения в ЛО, в которых выполнены исследования по определению предварительного критерия оценки качества воды по показателям РБ, установлены превышения критерия предварительной оценки качества питьевой воды по суммарной альфа-активности, что составляет около 8,96% от всех состоящих на контроле подземных источников водоснабжения.

Согласно данным контроля, выбросы с Ленинградской АЭС радиоактивных газов и аэрозолей в атмосферу не превышают 11% от допустимых выбросов для инертных радиоактивных газов, 8,5% – для <sup>60</sup>Co, 1,6% – для <sup>134</sup>Cs и менее 1% – для <sup>131</sup>I, <sup>137</sup>Cs.

На территории ЛО находится 29 населенных пунктов, пострадавших в результате аварии на Чернобыльской АЭС, из которых 22 находятся в Кингисеппском районе с общей численностью населения 3319 человек и 7 – в Волосовском районе с общей численностью населения 6891 человек.

Консервативно оцениваемые средние годовые эффективные дозы облучения, используемые для целей зонирования населенных пунктов, в 2016 г. у жителей населенных пунктов ЛО, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения, не превышают 0,090 мЗв/год. Фактически полученные населением в 2016 г. средние годовые эффективные дозы облучения вследствие аварии на Чернобыльской АЭС не превышают 0,082 мЗв/год [30].

В СПб и ЛО радиационных аварий, оказывающих влияние на радиационный фон и дозы техногенного облучения населения, за исследуемый период зарегистрировано не было.

Таким образом, по данным ЕСКИД и РГП, радиационная обстановка в СПб и ЛО является стабильной. Действующая Ленинградская АЭС не оказывает заметного влияния на радиационный фон, а радиоактивность выбросов и сбросов находится на уровне ниже допустимых.

#### *Демографическая ситуация и состояние здоровья населения*

Ионизирующее излучение, являясь мифологизированным фактором окружающей среды, зачастую связывается населением с неблагоприятной медико-демографической ситуацией в регионе. При этом возникает существенное различие между объективными данными и субъективными представлениями о реальной опасности, связанной с ионизирующей радиацией. Для того чтобы иметь возможность выявить это несоответствие, специалистам при организации риск-коммуникации необходимо обладать знаниями о демографической ситуации и состоянии здоровья населения региона.

Возрастная структура населения СПб и ЛО относится к регрессивному типу. Демографическая ситуация в обоих регионах в исследуемые годы характеризуется непрерывным ростом численности постоянно проживающего населения, в первую очередь за счет миграционного притока.

Ожидаемая продолжительность жизни в СПб на 2016 г. (74,9 года) на три года превышает общероссийский показатель (71,9 года), в ЛО она практически идентична среднероссийской (71,7 года).

Показатель общей заболеваемости в СПб в 2016 г. на 80 000 случаев превышал среднероссийский, в ЛО был ниже на 45 000 случаев. Среди всех причин смертности от злокачественных новообразований находится на втором месте в СПб и ЛО (21,8% и 17,1% смертей соответственно). Уровень онкологической заболеваемости в ЛО (118,42) ниже, чем показатель по СПб (128,84) и Российской Федерации (114,79). Показатели заболеваемости населения ЛО (максимальное значение 442,1 в 2016 г.) врожденными аномалиями ниже, чем в СПб (897,2) и в среднем по России (785,6), что может быть связано с качеством диагностики.

#### *Установки населения по вопросам РБ*

Исследование установок населения по вопросам РБ является ключевым в ряду исследований, направленных на выбор наиболее эффективных методов и средств риск-коммуникации. В ходе социологического исследования можно определить уровень тревожности населения в отношении различных источников радиационной опасности, информированность населения в вопросах РБ, информационные запросы населения по состоянию РБ, предпочтительные формы и источники получения информации, доверие к различным источникам информации.

В ходе опроса жителей СПб и ЛО просили оценить факторы риска различной природы, способные существенно повлиять на жизнь, здоровье и благополучие человека. Наиболее массовым является признание риска войны и террористического акта – их боятся 70% и более опрошенных. Следом за ними идут страхи остаться без медицинской помощи, без средств к существованию и *радиоактивного загрязнения* – 65–66%. Они опережают распространенные в массовом сознании риски других типов загрязнения (химическое, биологическое), эпидемий и катастроф (включая транспортные и экологические). Риски бытовых и производственных травм, переутомления, воздействия шума, климатических изменений оцениваются массовым сознанием значительно слабее. Меньше всего жители региона боятся развития негативных последствий употребления алкоголя и табака.

Для уточнения реального уровня знаний в рассматриваемой области респондентам был задан показательный вопрос – известные признаки радиоактивного излучения и приборы, являющиеся источниками ионизирующего излучения. В СПб и ЛО только 28% респондентов выбрали правильный ответ «радиоактивное излучение нельзя обнаружить без специальных приборов». В этих двух регионах в ответах нет явных различий при уровне достоверности 0,05 ( $\chi^2=10,244$ ;  $\chi_{крит}=15,507$ ;  $df=8$ ;  $p=0,05$ ). Сравнивая эти два региона с Сосновым Бором, можно выделить существенное различие между ответами (СПб и Сосновый Бор:  $\chi^2=89,042$ ;  $df=8$ ;  $p<0,001$ ; ЛО и Сосновый

Бор:  $\chi^2=89,615$ ;  $df=8$ ;  $p<0,001$ ). В Сосновом Бору доля ответивших правильно больше и составляет 34%.

Анализ результатов ответов на вопрос «Какие приборы и устройства, являющиеся источниками ионизирующего излучения, Вам известны?» показывает, что знания населения по вопросам РБ могут быть охарактеризованы как фрагментарные и неуверенные. Наряду с самым популярным правильным ответом «рентгеновский аппарат», который по региону выбрали 44% респондентов, популярностью пользовались такие варианты ответов, как «микроволновая печь» (28%), «телевизор, холодильник» (27%). Затруднились ответить 28% опрошенных.

Наиболее высокий интерес к материалам по вопросам РБ в СМИ проявили жители Соснового Бора – 61%. Интерес жителей и СПб, и ЛО к таким материалам находится на уровне 46% ( $\chi^2=6,234$ ;  $\chi_{крит}=7,815$ ;  $df=3$ ;  $p=0,05$ ). Различия между ответами в этих регионах с Сосновым Бором достоверны (СПб и Сосновый Бор:  $\chi^2=58,195$ ;  $df=8$ ;  $p<0,001$ ; ЛО и Сосновый Бор:  $\chi^2=61,133$ ;  $df=8$ ;  $p<0,001$ ). В тематической структуре информационных запросов населения по вопросам РБ выделяются три направления: меры защиты от радиации, доступные по месту жительства; воздействие радиации на организм и влияние на здоровье; опасные и безопасные уровни радиации.

Среди всех источников информации безусловными лидерами по уровню доверия населения являются МЧС, ученые и специалисты – в вопросах РБ им доверяют от 70–78% жителей СПб, ЛО и Соснового Бора. Причем это единственные источники информации, которые пользуются полным доверием значительной (около 30%) части аудитории. Органам Роспотребнадзора доверяет 42% жителей.

В ходе анкетирования респондентам предлагалось ответить на вопрос: «Если говорить об информации по оценке радиационной обстановки и безопасности, размещенной в Интернете, то каким из следующих источников вы доверяете?». Доверие к официальному сайту Роспотребнадзора находится на сравнительно высоком уровне (25%). На таком же уровне доверия находятся официальные сайты Росатома (25%). Остальные источники (официальные сайты местной власти, социальные сети, блоги и т.д.) пользуются меньшим доверием. Наиболее высокий уровень доверия к официальному сайту Роспотребнадзора наблюдается у жителей СПб.

Респондентам предлагалось выбрать 2–3 информационных источника, наиболее подходящих для получения информации о радиационной обстановке. Наиболее предпочтительными источниками для населения во всех исследуемых территориях стали Интернет (45% в СПб, 35% в ЛО), региональные ТВ-каналы (43% в СПб, 33% в ЛО), региональные новости на федеральных ТВ-каналах (34% в СПб, 34% в ЛО) и СМС-оповещение (18% в СПб, 20% в ЛО). Более подробно результаты исследования установок населения СПб, ЛО и Соснового Бора представлены в работах [31–33].

#### *Общественные организации*

Направленность публикаций и публичных выступлений ОО может склонить общественность как к адекватному восприятию обсуждаемых проблем, так и к протестным настроениям. В связи с этим при планировании региональной программы ведения риск-коммуникации

по вопросам РБ важно оценивать место ОО в информационном поле и выявлять ОО, пользующиеся доверием у населения. Необходимо учитывать ангажированность и негативное отношение отдельных ОО к проектам атомной отрасли. Взаимодействие с ОО специалистов всех организаций, ведомств и учреждений, вовлеченных в работу по обеспечению РБ населения, способно улучшить качество риск-коммуникации, способствовать формированию адекватного восприятия радиационного фактора населением и сохранить его.

Больше половины респондентов в СПб и ЛО не слышали о ключевых ОО (73% и 60%), что указывает на достаточно низкую эффективность их активности в информировании населения о проблемах РБ. Наиболее известными ОО среди населения обоих регионов являются «Гринпис» и Всемирный фонд дикой природы (WWF). Их потенциал влияния обусловлен активностью в информационном поле. Эти ОО выделяются по количеству подписчиков в социальных сетях (более 400 000 подписчиков у каждой), что говорит о значительном потенциале данного коммуникационного ресурса. Более подробно материал, изложенный в данном разделе, представлен в статье [34].

#### *Контент-анализ СМИ*

Исследование информационного поля проводится для выявления установок, транслируемых населению через СМИ. Анализ материалов СМИ позволяет выявить ключевые темы, волнующие журналистов и население, определить установки СМИ относительно вопросов РБ, транслируемые населению. За исследуемый период 2016 г. различным вопросам РБ в исследуемых СМИ СПб и ЛО было посвящено 1075 информационных материалов. Наибольшее количество публикаций пришлось на второй квартал 2016 г. При этом пик публикационной активности по вопросам РБ пришелся на апрель, что связано с 30-летием аварии на Чернобыльской АЭС. 26 апреля 2016 г. в день 30-летия аварии на Чернобыльской АЭС был опубликован 61 материал. Наибольшая публикационная активность была характерна для сетевых изданий.

Как по всем, так и по отдельным категориям СМИ значительную часть (более 50%) составляют публикации нейтрального характера. Они превалируют как над негативными, так и над позитивными материалами. Наибольшее количество негативных публикаций содержится в материалах ТВ-каналов и сетевых изданий – 21 и 23% соответственно. При этом во всех категориях СМИ Соснового Бора отмечается практически полное отсутствие негативных материалов, а на материалы с нейтральным и позитивным характером представления информации приходится 99,5%.

Анализ показал, что жанром подавляющего количества публикаций является информационный. Аналитические материалы представляют крайне незначительную часть: их количество находится в диапазоне от 1,6% до 8% в зависимости от категории СМИ. Наибольшее количество аналитических материалов опубликовано в газетах.

Только для СМИ Соснового Бора характерно активное привлечение специалистов по вопросам РБ при подготовке информационных материалов. Подробно результаты контент-анализа представлены в работе [35].

### Заключение

В ходе выполнения данной работы была предложена модель риск-коммуникации по вопросам РБ. Методической основой и главным принципом модели риск-коммуникации является её непрерывный и циклический характер. Непрерывность достигается за счет существования постоянной обратной связи между населением и другими заинтересованными сторонами (учеными, специалистами, властями, бизнесом и т.д.).

Этап научных исследований в предлагаемой модели риск-коммуникации по вопросам РБ позволяет выявить региональные особенности для последующего их учета в региональной программе. Так, в ЛО эксплуатируются объекты 1–2 категории опасности, следствием чего является необходимость быть готовыми не только к кризисной риск-коммуникации, но и к риск-коммуникации, направленной на борьбу с информационными вбросами. Исследование показало достоверное различие между установками по РБ между жителями ЛО и г. Сосновый Бор по таким вопросам, как уровень знаний и интерес к тематике РБ. Именно выявление таких местных особенностей позволяет добиться максимальной эффективности ведения риск-коммуникации по вопросам РБ в отдельных населенных пунктах регионов.

В настоящее время в Российской Федерации отсутствуют научно обоснованные рекомендации по ведению риск-коммуникации для отдельных сценариев облучения, таких как проживание на радоноопасных территориях, медицинское облучение, планирование строительства радиационно-опасных объектов, возникновение информационных «вбросов» о радиационных авариях и т.д. Сценарии, касающиеся кризисной коммуникации, прорабатываются различными министерствами и ведомствами, в то время как сценарии, которые входят в сферу ответственности Роспотребнадзора, в настоящее время не имеют надлежащего методического обеспечения.

### Литература

1. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы (СанПиН 2.6.1.2523-09): утв. и введены в действие от 07 июля 2009 г. взамен СанПиН 2.6.1.758-99. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 100 с.
2. Онищенко, Г.Г. Анализ риска здоровью в стратегии государственного социально-экономического развития: монография / Г.Г. Онищенко, Н.В. Зайцева, И.В. Май и др.; под общ. ред. Г.Г. Онищенко, Н.В. Зайцевой. – М.: Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 783 с.
3. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. Руководство 2.1.10.1920-04 // Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России. – М., 2004. – 143 с.
4. Барг, А.О. Риск-коммуникация как механизм формирования адекватной оценки рисков для здоровья населения / А.О. Барг, Н.А. Лебедева-Несевря // Здоровье населения и среда обитания. – 2014. – Т. 261, № 12. – С. 9-11.
5. Лебедева-Несевря, Н.А. Риск-коммуникации как инструмент управления здоровьем населения / Н.А. Лебедева-Несевря // Анализ риска здоровью. – 2014. – № 2. – С. 83-89.
6. Perko T. Risk communication in the case of the Fukushima accident: impact of communication and lessons to be learned. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 12(4), pp. 683–686.
7. Ng K. H., Lean M. L. The Fukushima nuclear crisis reemphasizes the need for improved risk communication and better use of social media. *Health physics*, 2012, Vol. 103, №. 3, pp. 307-310.
8. Зыкова, И.А. Анализ публикаций об аварии на АЭС «Фукусима-1» в средствах массовой информации / И.А. Зыкова [и др.] // Радиационная гигиена. – 2011. – Т. 4, № 3. – С. 43–49.
9. Мелихова, Е.М. О некоторых механизмах социального усиления восприятия риска для здоровья при освещении в СМИ аварии на АЭС Фукусима / Е.М. Мелихова, Е.М. Быркина, Ю.А. Першина // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2013. – Т. 58, № 4. – С. 5–16.
10. Романович, И.К. Авария на АЭС «Фукусима-1»: организация профилактических мероприятий, направленных на сохранение здоровья населения Российской Федерации / Под ред. Г.Г. Онищенко. – СПб.: НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2012. – 336 с.
11. Covello, V.; Sandman, P.M. Risk communication: Evolution and Revolution. In: A. Wolbarst (ed.), *Solutions to an Environment in Peril*. Baltimore: John Hopkins University Press, 2001, pp. 164–178.
12. Горский, А.А. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации за 2012 год (Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации) / А.А. Горский, В.С. Степанов, О.В. Липатова [и др.]. – М., 2013. – 130 с.
13. Горский, А.А. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации за 2013 год (Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации) / А.А. Горский, В.С. Степанов, С.В. Матюхин [и др.]. – М., 2014. – 132 с.
14. Попова, А.Ю. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации за 2014 год (Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации) / А.Ю. Попова, И.В. Брагина, И.Г. Шевкун [и др.]. – М., 2015. – 134 с.
15. Шевкун, И.Г. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации за 2015 год (Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации) / И.Г. Шевкун, В.С. Степанов, С.В. Матюхин [и др.]. – М., 2016. – 125 с.
16. Шевкун, И.Г. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации за 2016 год (Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации) / И.Г. Шевкун, В.С. Степанов, С.В. Матюхин [и др.]. – М., 2017. – 125 с.
17. Барышков, Н.К. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2012 году: информ. сборник / Н.К. Барышков. – СПб, 2013. – 67 с.
18. Репин, В.С. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2013 году: информ. сборник / В.С. Репин. – СПб, 2014. – 60 с.
19. Репин, В.С. Дозы облучения населения Российской Федерации по итогам функционирования ЕСКИД в 2002-2015 гг.: информ. сборник / В.С. Репин. – СПб, 2015. – 40 с.
20. Барковский, А.Н. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2015 году: информационный сборник / А.Н. Барковский, Н.К. Барышков, А.А. Братилова, Т.А. Кормановская, Л.В. Репин, И.К. Романович, В.С. Степанов, Т.Н. Титова. – СПб., 2016. – 72 с.
21. Барковский, А.Н. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2016 году / А.Н. Барковский, Н.К. Барышков, А.Н. Братилова, Г.Я. Брук, Б.Ф. Воробьев, Т.А. Кормановская, Л.В. Репин, И.К. Романович, Т.Н. Титова, В.С. Степанов, А.Г. Цовьянов, А.Г. Сивенков, В.Е. Журавлева // Информационный сборник. – СПб., 2017. – 78 с.
22. Злокачественные новообразования в России в 2012 году (заболеваемость и смертность). – М.: ФГБУ «МНИОИ им. П.А. Герцена» Минздрава России, 2014. – 250 с.

23. Злокачественные новообразования в России в 2013 году (заболеваемость и смертность). – М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России, 2015. – 250 с.
24. Злокачественные новообразования в России в 2014 году (заболеваемость и смертность). – М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России, 2016. – 250 с.
25. Злокачественные новообразования в России в 2015 году (заболеваемость и смертность). – М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России, 2017. – 250 с.
26. Злокачественные новообразования в России в 2016 году (заболеваемость и смертность). – М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России, 2018. – 250 с.
27. «Основные показатели демографических процессов в Санкт-Петербурге в 2016 году» Статистический сборник / Петростат. – СПб., 2017. – 88 с.
28. «Основные показатели демографических процессов в Ленинградской области в 2016 году» Статистический сборник / Петростат. – СПб., 2017. – 98 с.
29. Мерабишвили, В.М. Злокачественные новообразования в Северо-Западном федеральном округе России (заболеваемость, смертность, контингенты, выживаемость больных) / Под ред. проф. А.М. Беляева. – СПб., 2017. – 282 с.
30. Брук, Г.Я. Радиационная обстановка на территориях Ленинградской области, пострадавших вследствие аварии на Чернобыльской АЭС / Г.Я. Брук [и др.] // Радиационная гигиена. – 2017. – Т. 10. – №. 3. – С. 103-112.
31. Соколов, Н.В. Проблемы риск-коммуникации при обеспечении радиационной безопасности: представление о радиации и атомной отрасли в массовом сознании по результатам социологических исследований в Санкт-Петербурге, Ленинградской и Мурманской областях / Н.В. Соколов, А.М. Библин, Л.В. Репин, Л.С. Рехтина // Радиационная гигиена. – 2017. – Т. 10, №. 3. – С. 45-56.
32. Архангельская, Г.В. Проблемы риск-коммуникаций по вопросам радиационной безопасности: оценка информированности населения Санкт-Петербурга и Ленинградской области о деятельности атомной отрасли и его представления о факторах опасности / Г.В. Архангельская, С.А. Зеленцова, Н.М. Вишнякова, Е.В. Храмцов, К.В. Варфоломеева, Н.В. Соколов, В.С. Репин // Радиационная гигиена. – 2017. – Т. 10, №. 3. – С. 36-45.
33. Библин, А.М. Риск-коммуникация при обеспечении радиационной безопасности: доверие населения к Интернету как источнику информации о радиационной обстановке / А.М. Библин, Р.Р. Ахматдинов; под ред. проф. А.Ю. Поповой, акад. РАН Н.В. Зайцевой // Фундаментальные и прикладные аспекты анализа риска здоровью населения: материалы всероссийской научно-практической интернет-конференции молодых ученых и специалистов Роспотребнадзора. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2017. – С. 263-274.
34. Библин, А.М. Проблемы риск – коммуникации: общественные организации и их роль в формировании общественного мнения по вопросам радиационной безопасности населения / А.М. Библин, Н.М. Вишнякова, К.В. Варфоломеева, С.А. Зеленцова, Е.В. Храмцов, Р.Р. Ахматдинов // Радиационная гигиена. – 2018. – Т. 11, №. 1. – С. 101-112.
35. Библин, А.М. Анализ характера освещения в средствах массовой информации радиационной безопасности населения Санкт-Петербурга и Ленинградской области / А.М. Библин // Радиационная гигиена. – 2017. – Т. 10, №. 2. – С. 23-30.

Поступила: 20.01.2019 г.

**Библин Артем Михайлович** – руководитель Информационно-аналитического центра, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: a.biblin@niirg.ru

**Для цитирования:** Библин А.М. Модель риск-коммуникации с населением по вопросам радиационной безопасности и проведение на её основе научных исследований // Радиационная гигиена. – 2019. – Т. 12, №. 1. – С. 74-84. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-74-84

## Development of the model of radiation risk-communication with the public for the arrangement of the research

Artem M. Biblin

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

*The aim of the study was to justify and develop a model of risk communication with the public on radiation protection issues and to conduct research based on it in St. Petersburg and the Leningrad Region. The proposed model of risk communication consists of five continuously and cyclically alternating each other stages: 1) scientific research; 2) a scientifically based system of practical measures; 3) a regional risk communication program on the radiation protection of the public; 4) practical arrangements for the implementation of the program; 5) research to assess the effectiveness of risk communication. Four sets of questions to be answered in the framework of scientific research were identified: 1) the characteristics of the radiation-hygienic environment; 2) the demographic situation and the state of health of the public; 3) attitudes of the participants of the risk information field; 4) information field characteristic. The results obtained through the research allowed substantiating the system of practical measures: 1) to determine the directions of risk communication, 2) to assess the need for developing local programs within the framework of regional ones; 3) to assess the level of knowledge and perceptions of the public about possible sources of radiation risk; 4) to identify stakeholders in risk communication; 5) to determine the types and list of information materials and information resources that are optimal for different groups of stakeholders. The conducted studies indicate that the radiation situation in St. Petersburg and the Leningrad Region is stable. These regions contain all exposure situations that require the development of local risk communication programs. Several differences were revealed in health indicators of the public in St-Petersburg and the Leningrad region. Public knowledge on radiation protection issues can be characterized as fragmented and uncertain. The preferred source of information for the public is the Internet. Among all sources of information, unconditional leaders in the level of public confidence are the employees of the Ministry of Emergency Situations, scientists and specialists. More than half of the respondents in St-Petersburg and the Leningrad Region (73% and 60% respectively) had no information about key public organizations covering issues of the radiation protection of the public, which indicates a rather low effectiveness of the activity of these public organizations. Both in all and in certain categories of mass media, a significant part (more than 50%) are publications with a neutral presentation of information. Only the media of the city of Sosnovy Bor is characterized by the active involvement of specialists in the radiation safety of the public in the preparation of information materials.*

**Key words:** risk communication, radiation protection, ionizing radiation, sociological survey, exposure doses, public.

### References

1. Radiation safety standards (RSS-99/2009). Sanitary-epidemiological rules and standards. SP2.6.1.252309. Moscow, Federal Center of Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2009, 100 p. (In Russian).
2. Onischenko G.G., Zaytseva N.V., May I.V. [et al.] Health risk analysis in the strategy of state social and economic development: monograph. In: G.G. Onischenko, N.V. Zaitseva eds. Perm, Publishing house of Perm National Research Polytechnic University, 2014, 783 p. (in Russian).
3. Guidelines for health risk assessment of exposure to chemical substances polluting the environment R 2.1.10.1920-04. Federal center of Gossanepidnadzor of the Ministry of Health of Russia, 2004, 143 p. (In Russian).
4. Barg A.O., Lebedeva-Nesevrya N.A. Risk-communication is an effective way of producing the cumulative acceptability of human health risks. *Zdorovie naseleniya i sreda obitaniya = Population Health and Life Environment*, 2014, V. 261, № 12, pp. 9-11. (In Russian).
5. Lebedeva-Nesevrya N.A. Risk-communications as an instrument for public health management. *Analiz riska zdorovyu = Health Risk analysis*, 2014, № 2, pp. 83-99. (In Russian).
6. Perko T. Risk communication in the case of the Fukushima accident: impact of communication and lessons to be learned. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 12(4), pp. 683-686.
7. Ng K. H., Lean M. L. The Fukushima nuclear crisis reemphasizes the need for improved risk communication and better use of social media. *Health physics*, 2012, Vol. 103, №. 3, pp. 307-310.
8. Zykova I.A., Garbuz Yu.A., Zelentsova S.A., Romanova O.B. Analysis of media publications on the Fukushima nuclear power plant accident. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene*, 2011, Vol. 4, No 3, pp. 43-49. (In Russian)
9. Melikhova E.M., Byrkina E.M., Pershina Yu.A. On the Issue of Certain Mechanisms of Social Amplification of Risk in Media Coverage of the Fukushima NPP Nuclear Accident. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*, 2013, Vol. 58, № 4, pp. 5-16. (In Russian)

Artem M. Biblin

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

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

10. Romanovich I.K. [et al.] The accident at the «Fukushima-1» NPP: the preventive measures organization aimed at the preservation of the Russian Federation public health. Ed.: G.G. Onischenko. St. Petersburg., Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, 2012, 336 p. (In Russian).
11. Covello, V.; Sandman, P.M. Risk communication: Evolution and Revolution. In: A. Wolbarst (ed.), Solutions to an Environment in Peril. Baltimore: John Hopkins University Press, 2001, pp. 164–178.
12. Gorsky A.A., Stepanov V.S., Lipatova O.V., Matyukhin S.V., Romanovich I.K., Barkovsky A.N., Baryshkov N.K., Bruk G.Ya., Stamat I.P., Kormanovskaya T.A., Titova T.N., Vereshchagin A.I., Tutelyan O.E., Kuvshinnikov S.I., Rusanovskaya E.V. [et al.]. Results of radiation-hygienic passportization for 2012 (Radiation-Hygienic Passport of the Russian Federation), Moscow, 2013, 130 p. (In Russian)
13. Gorsky A.A., Stepanov V.S., Matyukhin S.V., Romanovich I.K., Barkovsky A.N., Baryshkov N.K., Bruk G.Ya., Stamat I.P., Kormanovskaya T.A., Titova T.N., Vereshchagin A.I., Tutelyan O.E., Kuvshinnikov S.I., Rusanovskaya E.V. [et al.]. Results of radiation-hygienic passportization for 2013 (Radiation-Hygienic Passport of the Russian Federation), Moscow, 2014, 132 p. (In Russian).
14. Popova A.Yu., Bragina I.V., Shevkun I.G., Gorsky A.A., Stepanov V.S., Matyukhin S.V., Romanovich I.K., Barkovsky A.N., Baryshkov N.K., Vorobyev B.F., Stamat I.P., Kormanovskaya T.A., Titova T.N., Sennikova V.G., Tutelyan O.E., Kuvshinnikov S.I., Rusanovskaya E.V. [et al.]. Results of radiation-hygienic passportization for 2014 (Radiation-Hygienic Passport of the Russian Federation), Moscow, 2015, 134 p. (In Russian).
15. Shevkun I.G., Stepanov V.S., Matyukhin S.V., Romanovich I.K., Barkovsky A.N., Baryshkov N.K., Stamat I.P., Kormanovskaya T.A., Titova T.N., Sennikova V.G., Tutelyan O.E., Kuvshinnikov S.I., Rusanovskaya E.V. [et al.]. Results of radiation-hygienic passportization for 2015 (Radiation-Hygienic Passport of the Russian Federation), Moscow, 2016, 125 p. (In Russian).
16. Shevkun I.G., Stepanov V.S., Matyukhin S.V., Romanovich I.K., Barkovsky A.N., Baryshkov N.K., Stamat I.P., Kormanovskaya T.A., Titova T.N., Sennikova V.G., Tutelyan O.E., Kuvshinnikov S.I., Rusanovskaya E.V. [et al.]. Results of radiation-hygienic passportization for 2016 (Radiation-Hygienic Passport of the Russian Federation), Moscow, 2017, 125 p. (In Russian).
17. Baryshkov N.K., Bratilova A.A., Kormanovskaya T.A., Kuvshinnikov S.I., Lipatova O.V., Matyukhin S.V., Repin V.S., Stamat I.P., Stepanov V.S., Tutelyan O.E. Information packet: Radiation exposure doses of the public of the Russian Federation in 2012, Saint-Petersburg, 2013, 67 p. (In Russian).
18. Repin V.S., Baryshkov N.K., Bratilova A.A., Kormanovskaya T.A., Kuvshinnikov S.I., Matyukhin S.V., Stamat I.P., Repin L.V., Akhmatdinov R.R., Stepanov V.S., Tutelyan O.E. Information packet: Radiation exposure doses of the public of the Russian Federation in 2013, Saint-Petersburg, 2014, 60 p. (In Russian).
19. Repin V.S., Baryshkov N.K., Bratilova A.A., Varfolomeeva K.V., Goncharova Yu.N., Kononenko D.V., Kormanovskaya T.A., Repin L.V., Romanovich I.K., Svetovidov A.V., Stamat I.P., Kuvshinnikov S.I., Matyukhin S.V., Stepanov V.S., Tutelyan O.E. Information packet: Radiation exposure doses of the public of the Russian Federation according to the results of the USIDC in 2002-2015, Saint-Petersburg, 2015, 40 p. (In Russian).
20. Barkovsky A.N., Baryshkov N.K., Bratilova A.A., Kormanovskaya T.A., Repin L.V., Romanovich I.K., Stepanov V.S., Titova T.N. Information packet: Radiation exposure doses of the public of the Russian Federation in 2015, Saint-Petersburg, 2016, 72 p. (In Russian).
21. Barkovsky A.N., Baryshkov N.K., Bratilova A.A., Kormanovskaya T.A., Repin L.V., Romanovich I.K., Stepanov V.S., Titova T.N. Information packet: Radiation exposure doses of the public of the Russian Federation in 2016, Saint Petersburg, 2017, 78 p. (In Russian).
22. Kaprin A.D., Starinsky V.V., Petrova G.V., eds. Malignant neoplasms in Russia in 2012 (morbidity and mortality). Moscow, Federal State Budget Institution Moscow Research Institute of Oncology named after P.A. Herzen Ministry of Health of the Russian Federation, 2014, 250 p. (in Russian).
23. Kaprin A.D., Starinsky V.V., Petrova G.V., eds. Malignant neoplasms in Russia in 2013 (morbidity and mortality). Moscow, Federal State Budget Institution Moscow Research Institute of Oncology named after P.A. Herzen Ministry of Health of the Russian Federation, 2015, 250 p. (in Russian).
24. Kaprin A.D., Starinsky V.V., Petrova G.V., eds. Malignant neoplasms in Russia in 2014 (morbidity and mortality). Moscow, Federal State Budget Institution Moscow Research Institute of Oncology named after P.A. Herzen Ministry of Health of the Russian Federation, 2016, 250 p. (in Russian).
25. Kaprin A.D., Starinsky V.V., Petrova G.V., eds. Malignant neoplasms in Russia in 2015 (morbidity and mortality). Moscow, Federal State Budget Institution Moscow Research Institute of Oncology named after P.A. Herzen Ministry of Health of the Russian Federation, 2017, 250 p. (in Russian).
26. Kaprin A.D., Starinsky V.V., Petrova G.V., eds. Malignant neoplasms in Russia in 2016 (morbidity and mortality). Moscow, Federal State Budget Institution Moscow Research Institute of Oncology named after P.A. Herzen Ministry of Health of the Russian Federation, 2018, 250 p. (in Russian).
27. Key indicators of demographic processes in St. Petersburg in 2016. Statistical compendium. Petrostat, St. Petersburg, 2017, 88 p. (in Russian).
28. Key indicators of demographic processes in Leningrad region in 2016. Statistical compendium. Petrostat, St. Petersburg, 2017, 98 p. (in Russian).
29. Merabishvili V.M. Malignant tumors in the North-West Federal Region of Russia (morbidity, mortality, prevalence rate, survival). Express information. Issue three. St. Petersburg, 2017, 282 p. (in Russian).
30. Bruk G.Ya., Bazyukin A.B., Bratilova A.A., Istorik O.A., Eremina L.A. Radiation situation on the territories of the Leningrad Region affected by the Chernobyl accident. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene, 2017, Vol. 10, №3, pp. 103-112. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-3-103-112>.
31. Sokolov N.V., Biblin A.M., Repin L.V., Rekhina L.S. Risk communication issues in radiation safety: Mass consciousness about radiation and nuclear industry based on the results of a sociological research in St. Petersburg, the Leningrad region and the Murmansk region. Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene, 2017, Vol. 10, № 3, pp. 45- 56. (In Russian).
32. Arkhangel'skaya G.V., Zelentsova S.A., Vishnyakova N.M., Khramtsov E.V., Varfolomeeva K.V., Sokolov N.V., Repin V.S. Risk-communication issues in radiation safety: evaluation of public awareness in St. Petersburg and the Leningrad region on the activities of the nuclear industry and public understanding of the hazards. Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene, 2017, Vol. 10, № 3, pp. 36-45. (In Russian).
33. Biblin A.M., Akhmatdinov R.R. Risk communication in ensuring radiation safety: public confidence in the Internet as a source of information on radiation conditions. In: A.Yu. Popova, N.V. Zaitseva eds. Perm, 2017, pp. 263–274 (in Russian).
34. Biblin A.M., Vishnyakova N.M., Varfolomeeva K.V., Zelentsova S.A., Khramtsov E.V., Akhmatdinov R.R. Problems of risk communication: non-governmental organizations and their role in the development of the public opinion on issues of population's radiation protection. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene, 2018, Vol. 11, № 1, pp. 101-112. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-1-101-112>.
35. Biblin A.M. Analysis of the media coverage characteristics on radiation safety issues of the Saint-Petersburg and the Leningrad region population. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation hygiene, 2017, Vol. 10, No. 2, pp. 23-30. (In Russian).

Received: January 20, 2019

**For correspondence: Artem M. Biblin** – Head, Information Analytical Center, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: a.biblin@niirg.ru)

**For citation: Biblin A.M. Development of the model of radiation risk-communication with the publicpublic for the arrangement of the research. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene, 2019, Vol. 12, No. 1, pp.74-84. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-74-84**

## Анализ распределений значений объемной активности радона в воздухе помещений в субъектах Российской Федерации

Д.В. Кононенко

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

*За 2001–2017 гг. в Федеральном банке данных доз облучения граждан Российской Федерации за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона был накоплен массив результатов измерений содержания радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий в 78 субъектах Российской Федерации объемом более 800 тыс. записей. В статье описана процедура и приведены результаты впервые проведенного комплексного анализа этих данных, целью которого была проверка соответствия распределений объемной активности радона логнормальному закону и расчет параметров этих распределений. Был применен целый ряд методов анализа данных, таких как верификация и валидация, построение гистограмм частотного распределения и Q-Q диаграмм, а также некоторые методы восстановления формы распределения. В 74 из 78 субъектов Российской Федерации распределения значений объемной активности радона следуют логнормальному закону до уровней от 55 до 4915 Бк/м<sup>3</sup>. Для всех 78 субъектов Российской Федерации были рассчитаны среднее геометрическое с 95% доверительным интервалом, геометрическое стандартное отклонение и среднее арифметическое. Результаты исследования показывают, что использование при расчете доз внутреннего облучения населения радоном средних арифметических значений является некорректным и приводит к завышению доз в среднем в 1,3 раза, а в ряде случаев – в 2,1 раза. Полученные медианные значения могут быть использованы для расчета различных показателей риска для здоровья населения субъектов Российской Федерации при облучении радоном.*

**Ключевые слова:** радон, объемная активность, верификация, валидация, анализ данных, логнормальное распределение, параметры распределения, Q-Q диаграмма, восстановление формы распределения, федеральный банк данных.

### Введение

В 2001 г. в рамках становления и развития единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан (ЕСКИД) в стране была введена форма государственного (федерального) статистическо-

го наблюдения № 4-ДОЗ, с помощью которой была начата работа по сбору информации об уровнях и дозах природного облучения населения, которая продолжается до настоящего времени<sup>1,2,3</sup>. Результаты измерений, проводимых аккредитованными лабораториями в субъектах РФ,

<sup>1</sup> Форма государственного статистического наблюдения № 4-ДОЗ: Методические рекомендации (Инструкция по заполнению формы № 4-ДОЗ). М.: Минздрав России, 2002. 15 с.

[State statistical form No 4-DOZ: Guidelines (Instructions for completing the form No 4-DOZ). Moscow, Ministry of Health of Russia; 2002. 15 p. (In Russian)]

<sup>2</sup> Форма федерального государственного статистического наблюдения № 4-ДОЗ. Сведения о дозах облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона: Методические рекомендации. Утверждены 19.04.2007 г.

№ 0100/4027-07-34. 30 с.

[Federal state statistical form No 4-DOZ. Data on doses of public exposure to natural and technologically enhanced radiation background: Guidelines (approved 19.04.2007, No 0100/4027-07-34). 30 p. (In Russian)]

<sup>3</sup> Форма федерального статистического наблюдения № 4-ДОЗ. Сведения о дозах облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона: Методические рекомендации МР 2.6.1.0088-14. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2014. 39 с.

[Federal statistical form No 4-DOZ. Data on doses of public exposure to natural and technologically enhanced radiation background: Guidelines MR 2.6.1.0088-14. Moscow, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being; 2014. 39 p. (In Russian)]

**Кононенко Дмитрий Викторович**

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

**Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: d.kononenko@niirg.ru

передаются в региональные банки данных доз облучения граждан Российской Федерации за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона (РБДОПИ), операторами которых выступают Центры гигиены и эпидемиологии в субъектах РФ, а далее аккумулируются в Федеральном банке данных доз облучения граждан Российской Федерации за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона (ФБДОПИ), который установлен во ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева.

В обобщенном виде результаты, содержащиеся в ФБДОПИ, используются при подготовке ежегодного информационного сборника «Дозы облучения населения Российской Федерации» (например, [1]). В качестве оценок средних значений параметров радиационной обстановки, в частности содержания радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий (далее по тексту – содержание радона в воздухе), используются средние арифметические значения, полученные по всему накопленному массиву данных. Какие-либо процедуры верификации или валидации данных при этом не предусмотрены. Все это может приводить к искажению оценок средних значений параметров радиационной обстановки.

В настоящее время одной из актуальнейших задач является внедрение в практику санитарно-эпидемиологического надзора методологии оценки риска, а также гармонизация гигиенических нормативов с международными стандартами на основе этой методологии. Эта задача была поставлена руководством Роспотребнадзора еще в 1997 г.<sup>4</sup> и в дальнейшем не раз актуализировалась<sup>5,6,7</sup>. Принимая во внимание тот факт, что облучение человека радоном является пожизненным, становится очевидно, что при расчете показателей риска для здоровья населения при облучении радоном нельзя опираться на искаженные оценки средних значений содержания радона в воздухе в субъектах РФ, т.к. это может приводить к ошибкам в оценке таких чувствительных в социально-экономическом плане показателей, как количество случаев смерти от радон-индуцированного рака легкого [2] или количество по-

терянных лет жизни вследствие преждевременной смерти от радон-индуцированного рака легкого.

**Цель исследования** – проанализировать характер и получить параметры распределений значений ОА радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий в субъектах РФ на основе данных, содержащихся в ФБДОПИ.

**Задачи исследования** включали фильтрацию всего массива результатов измерений содержания радона в воздухе, накопленного в ФБДОПИ с 2001 по 2017 г., с помощью процедур верификации и валидации, а также дальнейшую статистическую обработку данных с применением различных методов.

Под *валидацией* в дальнейшем понимается процедура фильтрации результатов измерений содержания радона в воздухе помещений путем сопоставления с метрологическими характеристиками средств измерений (СИ), а под *верификацией* – процедура фильтрации результатов путем оценки релевантности дополнительных характеристик результатов измерений (в нашем случае – места проведения измерения) задаче получения наиболее корректного среднего значения ОА радона в воздухе помещений, при пребывании в которых происходит внутреннее облучение населения за счет ингаляционного поступления радона и дочерних продуктов его распада (ДПР).

## Материалы и методы

### Материалы

В таблицах баз данных (БД) РБДОПИ и ФБДОПИ, хранящих результаты измерений в помещениях, есть 6 столбцов с информацией о содержании изотопов радона в воздухе помещений: мгновенные измерения ОА радона; мгновенные измерения эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона; мгновенные измерения ЭРОА торона; квазиинтегральные измерения ОА радона; интегральные измерения ОА радона; среднегодовое значение ЭРОА изотопов радона (расчетное нормируемое

<sup>4</sup> Постановление Главного Государственного санитарного врача РФ от 10 ноября 1997 г. № 25 и Главного Государственного инспектора по охране природы от 10 ноября 1997 г. № 03-19/24-3483 «Об использовании методологии оценки риска для управления качеством окружающей среды и здоровья населения в Российской Федерации». [Resolution of the Chief State Sanitary Inspector of the Russian Federation No. 25 of November 10, 1997 and the Chief State Inspector of Nature Protection No. 03-19/24-3483 of November 10, 1997 “On the use of risk assessment methodology for environmental quality management and public health management in the Russian Federation”. (In Russian)]

<sup>5</sup> Решение коллегии Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека от 5 февраля 2010 г. «О внедрении методологии оценки риска для здоровья населения и задачи по ее совершенствованию». [Decision of the Board of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being of February 5, 2010 “On the implementation of a methodology for assessing the risk to public health and the task to improve it”. (In Russian)]

<sup>6</sup> Приказ Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека от 18 февраля 2010 г. № 57 «О реализации решения коллегии Роспотребнадзора от 5 февраля 2010 года «О внедрении методологии оценки риска для здоровья населения и задачи по ее совершенствованию». [Order of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being No. 57 of February 18, 2010 “On the implementation of the decision of the Board of Rosпотребнадзор of February 5, 2010 “On the implementation of a methodology for assessing the risk to public health and the task to improve it”. (In Russian)]

<sup>7</sup> Приказ Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека от 10 марта 2010 г. № 86 «О создании межведомственной рабочей группы по гармонизации гигиенических нормативов». [Order of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being No. 86 of March 10, 2010 “On the creation of an interdepartmental working group on the harmonization of hygienic standards”. (In Russian)]

значение ЭРОА<sub>Рн</sub> + 4,6·ЭРОА<sub>Тп</sub>). На этапе импорта данных были удалены столбцы с результатами мгновенных измерений ЭРОА торона (пренебрежимо малое влияние торона при расчете рисков не учитывается) и среднегодовыми значениями ЭРОА изотопов радона (являются расчетными значениями). Исходя из того, что 3 из 4 оставшихся столбцов несут информацию об ОА радона, результаты мгновенных измерений ЭРОА радона были пересчитаны в ОА с использованием коэффициента радиоактивного равновесия F между радоном и его ДПР, равным 0,5<sup>8</sup>. Таким образом, после импорта данных первоначальное количество записей в обрабатываемом массиве данных составило 811 194.

Верификация данных заключалась в том, что были отфильтрованы как нерелевантные результаты измерений, проведенные в нежилых технических помещениях, содержание радона в которых не может оказывать влияния на дозу внутреннего облучения населения (либо это влияние пренебрежимо мало) и показатели риска для здоровья. Занесение результатов измерений в таких помещениях в БД, равно как и дальнейшее включение этих результатов в расчет, представляется в корне неверным. В эту группу были включены следующие помещения: электрощитовые и распределительные устройства, чердаки, технические этажи в многоквартирных зданиях, лифтовые, лестничные

пролеты, подвалы, подполы, погреба, убежища, насосные, индивидуальные тепловые пункты, вентиляционные камеры, водомерные узлы, бойлерные, паркинги. После этапа верификации общее количество записей в обрабатываемом массиве данных составило 801 929, т.е. было отфильтровано 1,14% записей, признанных нерелевантными. Распределение количества записей по годам до и после процедуры верификации представлено в таблице 1.

Валидация данных проводилась отдельно по методам измерений (мгновенные, квазиинтегральные, интегральные) и заключалась в том, что были отфильтрованы как недействительные результаты измерений, значения которых находились ниже наименьшего значения минимально измеряемой ОА радона в воздухе с помощью СИ соответствующего типа. Для определения этих наименьших значений была составлена таблица, в которую были включены основные метрологические характеристики всех типов СИ, предназначенных для соответствующих измерений, имеющих на данный момент, по данным Государственного реестра средств измерений [3] (или имевших в период 2001–2017 гг.), действующее свидетельство об утверждении типа СИ.

Таким образом, нижние границы значений результатов измерений для валидации были определены следующим образом:

Таблица 1

**Распределение количества записей до и после верификации**

[Table 1

**Distribution of the number of records in the database before and after verification]**

Год [Year]	Импортировано [Imported]	Релевантные [Relevant]	Нерелевантные [Irrelevant]
2001	3357	3238	3,54%
2002	11 750	11 593	1,34%
2003	23 975	23 620	1,48%
2004	25 112	25 013	0,39%
2005	35 736	35 020	2,00%
2006	27 344	27 297	0,17%
2007	40 636	40 376	0,64%
2008	59 945	59 332	1,02%
2009	51 770	51 227	1,05%
2010	61 543	60 756	1,28%
2011	69 203	67 928	1,84%
2012	65 059	63 787	1,96%
2013	65 895	64 687	1,83%
2014	72 775	71 400	1,89%
2015	70 574	70 339	0,33%
2016	61 340	61 213	0,21%
2017	65 180	65 103	0,12%
<b>Всего [Total]</b>	<b>811 194</b>	<b>801 929</b>	<b>1,14%</b>

<sup>8</sup> Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после окончания их строительства, капитального ремонта, реконструкции по показателям радиационной безопасности: Методические указания МУ 2.6.1.2838-11. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. 26 с. [Radiation control and sanitary-epidemiological evaluation of residential, public and industrial buildings and facilities after end of their construction, capital repair, reconstruction: Methodical instructions MU 2.6.1.2838-11. Moscow, Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rosпотребнадzor; 2011. 26 p. (In Russian)]

- ЭРОА<sub>min</sub> = 1 Бк/м<sup>3</sup> для мгновенных измерений;
- ОА<sub>min</sub> = 1 Бк/м<sup>3</sup> для мгновенных измерений;
- ОА<sub>min</sub> = 15 Бк/м<sup>3</sup> для квазиинтегральных измерений;
- ОА<sub>min</sub> = 2 Бк/м<sup>3</sup> для интегральных измерений (с учетом мониторов радона).

В идеальном случае для валидации следовало бы использовать индивидуальные для каждого субъекта РФ нижние границы, в зависимости от реально используемых типов СИ. Однако это невозможно ввиду того, что сведения об используемых типах СИ предоставляются не всеми субъектами РФ и нерегулярно (это предусмотрено лишь в печатном варианте формы № 4-ДОЗ).

После этапа валидации общее количество записей в обрабатываемом массиве данных составило 797 363, т.е. было отфильтровано 0,57% записей, признанных недействительными. Распределение количества записей по годам до и после процедуры валидации представлено в таблице 2.

Таблица 2

Распределение количества записей до и после валидации [Table 2]

Distribution of the number of records in the database before and after validation]			
Год [Year]	Релевантные [Relevant]	Действительные [Valid]	Недействительные [Invalid]
2001	3238	3234	0,12%
2002	11 593	11 461	1,14%
2003	23 620	23 426	0,82%
2004	25 013	24 898	0,46%
2005	35 020	34 865	0,44%
2006	27 297	27 139	0,58%
2007	40 376	40 068	0,76%
2008	59 332	59 141	0,32%
2009	51 227	50 918	0,60%
2010	60 756	60 377	0,62%
2011	67 928	67 820	0,16%
2012	63 787	63 474	0,49%
2013	64 687	64 337	0,54%
2014	71 400	70 743	0,92%
2015	70 339	69 910	0,61%
2016	61 213	60 878	0,55%
2017	65 103	64 674	0,66%
<b>Всего [Total]</b>	<b>801 929</b>	<b>797 363</b>	<b>0,57%</b>

В целом, после процедур верификации и валидации было отфильтровано 1,71% от первоначально импортированного количества записей. В дальнейшем при анализе результатов измерений была выявлена довольно характерная ошибка операторов, осуществляющих ввод данных в БД на лабораторном уровне [4]: дублирование одного и того же результата мгновенного измерения путем ввода в столбцы ОА и ЭРОА с переходом от одной величины к другой с помощью коэффициента F=0,5. Такие результаты в дальнейшем были отфильтрованы (количество записей, соответственно, не изменилось).

Отдельно стоит отметить ряд субъектов РФ, в которых доля недействительных записей превышает ус-

ловный уровень в 2%: Хабаровский край (20,16%), Костромская область (10,01%), Республика Марий Эл (9,28%), Камчатский край (6,43%), Кировская область (4,96%), Курганская область (2,76%), Саратовская область (2,59%), Владимирская область (2,37%). Причины такого значительного количества недостоверных данных проанализированы далее.

### Методы

В случаях, когда редкими событиями нельзя пренебречь, а средние арифметические значения являются неинформативными, можно говорить об анализе распределений с тяжелыми хвостами. Распределение имеет тяжелый хвост, если его плотность вероятности убывает медленнее плотности вероятности экспоненциального закона. Например, логнормальное распределение относится к распределениям с так называемым умеренно тяжелым хвостом [5]: плотность вероятности для логнормального распределения убывает медленнее, чем для экспоненциального закона, но быстрее, чем для степенного.

Логнормальное распределение, при котором нормально распределены не сами случайные величины, а их логарифмы, свидетельствует о том, что оцениваемый показатель формируется благодаря мультипликативному воздействию факторов. При этом воздействие факторов, определяющих случайную величину, не суммируется, как в случае нормального распределения, а умножается, что и выражается в увеличении вероятности появления высоких значений (хвоста в правой части гистограммы частотного распределения) [6, 7]. Во многих физических, химических, биологических и токсикологических процессах случайные величины подчиняются именно логнормальному закону [8, 9].

В целом ряде работ было показано, что ОА радона в воздухе помещений более или менее точно подчиняется именно логнормальному закону [10–18]. Этот факт был также подтвержден Научным комитетом ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН) в отчетах 2000 и 2006 гг. [19, 20]. Мультипликативными факторами в данном случае являются удельная активность <sup>226</sup>Ra в подстилающих грунтах и материалах строительных конструкций, проницаемость грунтов, возможные пути поступления радона из грунта в помещения здания, разница давлений между наружным и внутренним воздухом, кратность воздухообмена в помещениях и др.

Оговорку «более или менее точно» необходимо было сделать по той причине, что ОА радона в воздухе помещений строго следует логнормальному закону до уровня порядка 200 Бк/м<sup>3</sup>, выше которого начинают наблюдаться отклонения. Предпринимался ряд попыток подобрать альтернативное распределение [21–24], но в результате более глубокого анализа данных было установлено, что ОА радона в помещении точно следует логнормальному закону в том случае, когда данные получены на территории одной геологической формации (платформы); в случае же рассмотрения данных, полученных на территории целого региона или страны, отклонения неизбежны [25].

Результаты измерений, намеренно проведенные в зданиях с высокими уровнями содержания радона, содержащиеся в общем массиве данных, искажают распределение, добавляя тяжелый хвост. При использовании в качестве оценки среднего значения содержания радона

среднего арифметического, являющегося гораздо менее робастной (устойчивой к различным отклонениям, неоднородностям и выбросам в выборке) характеристикой распределения по сравнению с медианой, возможна заметная переоценка доз за счет внутреннего облучения радоном. По этой причине результаты подобных измерений, как и результаты спланированных радоновых обследований, необходимо хранить отдельно от массива результатов рутинных измерений, коим являются РБДОПИ и ФБДОПИ.

Несмотря на то, что о несоответствии распределения ОА радона в воздухе помещений нормальному закону было известно на момент разработки первых версий комплекса программного обеспечения (ПО) для заполнения БД результатов измерений и генерации формы № 4-ДОЗ, в качестве оценки среднего значения содержания радона ПО рассчитывает среднее арифметическое по всему накопленному массиву данных. Возможно, это связано с тем, что расчет медианы (50-й процентиль для логнормального распределения совпадает со средним геометрическим) является более сложной вычислительной задачей. Как бы то ни было, накопленный к настоящему моменту объем данных об ОА радона в воздухе помещений в субъектах РФ позволяет провести полноценный анализ с целью проверки соответствия распределений этой величины логнормальному закону. Это позволит получить параметры распределений, в частности медиану, которая в дальнейшем может быть использована в процедурах расчета показателей риска для здоровья населения при облучении радоном.

Для решения этой задачи были использованы следующие методы статистической обработки данных: 1) построение гистограмм частотного распределения результатов измерений; 2) проверка гипотезы о нормальном характере распределения значений с помощью различных критериев (Хи-квадрат, W-критерия Шапиро – Уилка (для выборок объемом не более 2000 значений), критерия Колмогорова – Смирнова (в некоторых случаях для выборок небольшого объема), оценок коэффициентов асимметрии и эксцесса); 3) построение и визуальный анализ Q-Q диаграмм; 4) в ряде случаев – методы восстановления формы распределения (детали этих методов изложены далее по тексту). Поскольку первые два метода являются общеупотребительными, остановимся подробнее на методе построения и анализа Q-Q диаграмм [26] (диаграмм квантиль-квантиль или нормальных вероятностных графиков [27]), который является довольно распространенным в зарубежных научных работах инструментом анализа характера распределения значений ОА радона в воздухе [10, 28] и рекомендуется к применению МАГАТЭ [29], но в отечественных публикациях ранее не встречался.

Q-Q диаграмма показывает, насколько результаты измерений физической величины отклоняются от теоретических значений, полученных из нормального распределения с теми же параметрами, что и для эмпирических данных. В случае идеального совпадения диаграмма представляет собой прямую линию. В нашем случае в качестве результатов измерений используются натуральные логарифмы ОА радона. В качестве примера идеального совпадения на рисунке 1 представлены Q-Q диаграмма и гистограммы частотного распределения,

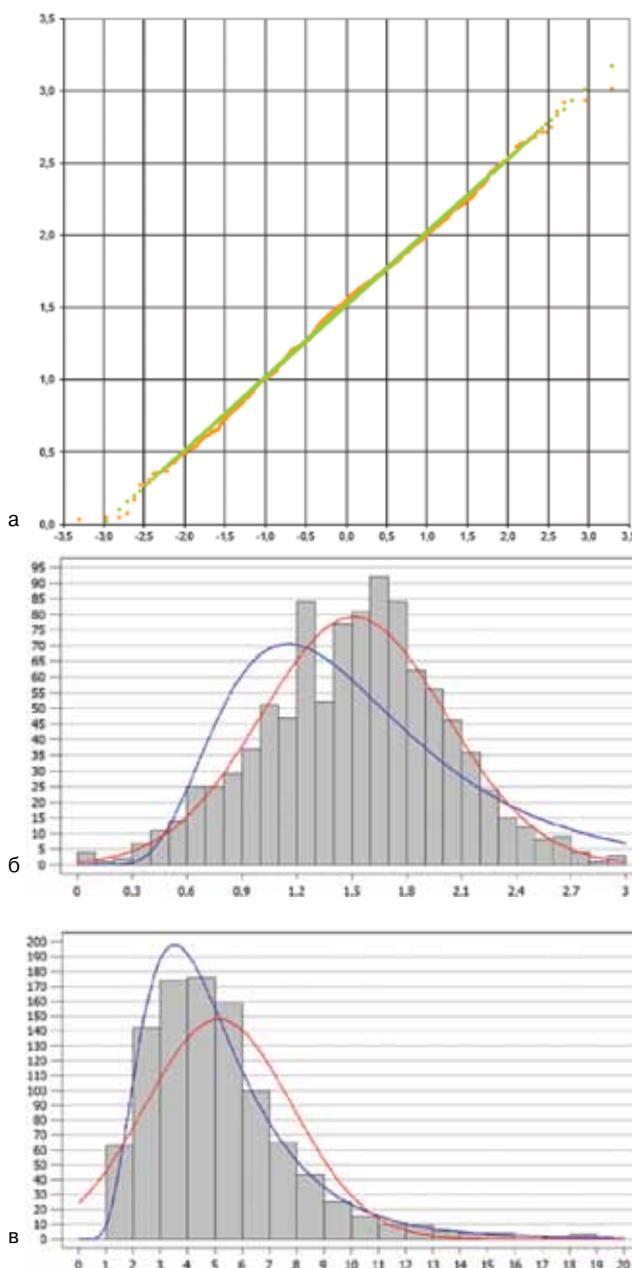


Рис. 1. Q-Q диаграмма и гистограммы частотного распределения для выборки объемом 1000 значений, сгенерированной случайным образом

[Fig. 1. Q-Q plot and frequency distribution histogram of a sample of size 1000 randomly generated from normal distribution with  $\mu=1,5$  and  $\sigma=0,5$ ]

построенные для выборки объемом 1000 значений, сгенерированной случайным образом из нормального распределения с параметрами  $\mu=1,5$ ;  $\sigma=0,5$  для моделирования логнормального распределения ОА радона в воздухе помещений в интервале значений 1–20 Бк/м<sup>3</sup>.

На Q-Q диаграмме, представленной на рисунке 1а, оранжевые точки – это сгенерированные случайным образом значения, а зеленые – теоретические значения, полученные из нормального распределения. По оси ординат отложены значения натурального логарифма ОА радона, а по оси абсцисс – z-значения (т.е. обратные значения стандартного нормального распределения, имею-

шего среднее, равное нулю, и стандартное отклонение, равное единице).

На рисунке 1б представлена гистограмма частотного распределения сгенерированных значений натурального логарифма ОА радона; видно, что эта выборка описывается нормальным законом (красная огибающая кривая). Гипотеза о нормальном характере распределения также подтверждается результатами расчетов критерия Хи-квадрат ( $p=0,17$ ), W-критерия Шапиро – Уилка ( $p=0,08$ ), оценки коэффициентов асимметрии ( $p=0,43$ ) и эксцесса ( $p=0,86$ ): поскольку наименьшее значение  $p \geq 0,05$ , то с вероятностью 95% данные подчиняются нормальному закону распределения. На основе критерия Колмогорова – Смирнова можно сделать вывод о том, что распределение значений, скорее всего, является нормальным ( $p=0,35$ ) и с вероятностью 95% не является логнормальным ( $p=0$ ).

На рисунке 1в представлена гистограмма частотного распределения значений ОА радона, полученных экспонированием из сгенерированных значений натурального логарифма; явно видно, что эта выборка описывается логнормальным законом (синяя огибающая кривая), а не нормальным (красная огибающая кривая). Гипотеза о нормальном характере распределения в этом случае не подтверждается с вероятностью 95% результатами расчетов критерия Хи-квадрат, W-критерия Шапиро – Уилка, оценки коэффициентов асимметрии и эксцесса: во всех случаях  $p=0$ . На основе критерия Колмогорова – Смирнова можно сделать вывод о том, что распределение значений, скорее всего, является логнормальным ( $p=0,35$ ) и с вероятностью 95% не является нормальным ( $p=0$ ).

Описанные выше методы были применены к массивам результатов измерений ОА радона в воздухе помещений в субъектах РФ, полученных всеми методами (мгновенными, квазиинтегральными и интегральными). При построении Q-Q диаграммы автоматически рассчи-

тывались и характеристики логнормального распределения [30]: медиана (GM) с 95% доверительным интервалом, геометрическое стандартное отклонение (GSD) и, для сравнения, среднее арифметическое (AM).

### Результаты и обсуждение

Из 85 субъектов РФ за период 2001–2017 гг. ни разу не передавали БД с результатами измерений радона в ФБДОПИ 5 субъектов: Республика Ингушетия, Чеченская Республика, Ульяновская область, Республика Крым и Севастополь. Для двух регионов (Астраханская область и Ненецкий АО) статистический анализ данных провести было невозможно ввиду того, что результаты всех измерений ОА радона (2473 в Астраханской области и 13 в Ненецком АО) были абсолютно идентичны и равны 20 Бк/м<sup>3</sup>.

Для остальных 78 субъектов РФ были построены Q-Q диаграммы и гистограммы частотного распределения значений ОА радона. Визуальный анализ Q-Q диаграмм позволил условно разделить регионы на четыре группы:

- практически идеальное совпадение с логнормальным распределением (19 регионов);
- хорошее совпадение с логнормальным распределением (16 регионов);
- недостаточное совпадение с логнормальным распределением (4 региона);
- на Q-Q диаграмме присутствует одно или два плато, искажающие логнормальное распределение (39 регионов).

В таблице 3 перечислены субъекты РФ, отнесенные к первой группе, и полученные характеристики распределений, в таблице 4 – субъекты РФ, отнесенные ко второй группе. На рисунке 2 представлены примеры Q-Q диаграмм, характерных для субъектов РФ из первой (рис. 2а) и второй групп (рис. 2б).

Таблица 3

**Регионы, в которых выявлено практически идеальное совпадение распределения значений ОА радона с логнормальным**  
[Table 3]

**Regions of Russia in which radon concentrations conform almost perfect to a lognormal distribution]**

Код [Code]	Субъект РФ [Region]	N	min	max	GM	GSD	AM
01	Республика Адыгея [The Republic of Adygea]	3869	2,6	1278	39,1 (37,9–40,4)	2,8	66,7
04	Республика Алтай [The Altai Republic]	10555	2	5128	98,2 (96,3–100,0)	2,6	163,9
09	Карачаево-Черкесская Республика [The Karachay-Cherkess Republic]	1477	13	854	71,1 (69,0–73,3)	1,8	84,9
11	Республика Коми [The Komi Republic]	4632	1,6	237	18,7 (18,3–19,1)	2,0	23,1
15	Республика Северная Осетия – Алания [The Republic of North Ossetia – Alania]	605	10	462	66,8 (63,7–69,9)	1,8	79,3
18	Удмуртская Республика [The Udmurt Republic]	1233	3	300	31,2 (30,2–32,2)	1,8	36,9

Код [Code]	Субъект РФ [Region]	N	min	max	GM	GSD	AM
28	Амурская область [Amur Oblast]	3381	2,2	1500	65,4 (64,2–66,7)	1,7	76,5
40	Калужская область [Kaluga Oblast]	7273	3,6	590	61,3 (60,7–61,9)	1,5	67,2
42	Кемеровская область [Kemerovo Oblast]	18683	2	1182	54,4 (53,9–55,0)	2,0	69,9
43	Кировская область [Kirov Oblast]	4961	2	1118	37,7 (37,1–38,3)	1,8	46,0
44	Костромская область [Kostroma Oblast]	4745	4	270	39,6 (39,0–40,2)	1,8	46,2
45	Курганская область [Kurgan Oblast]	4410	15	456,9	47,8 (47,0–48,7)	1,9	59,1
46	Курская область [Kursk Oblast]	3711	2,4	604	33,8 (33,2–34,4)	1,7	39,5
54	Новосибирская область [Novosibirsk Oblast]	43913	2	5550	35,6 (35,4–35,8)	1,7	43,8
61	Ростовская область [Rostov Oblast]	18397	1	1413	56,2 (55,6–56,8)	2,1	74,1
68	Тамбовская область [Tambov Oblast]	5179	9,2	219,5	43,0 (42,5–43,6)	1,6	48,4
71	Тульская область [Tula Oblast]	14084	5	1258	45,2 (44,8–45,6)	1,8	53,9
75	Забайкальский край [Zabaykalsky Krai]	5790	1	5532	109,7 (106,5–113,0)	3,2	231,2
79	Еврейская АО [Jewish Autonomous Oblast]	3565	2	4286	54,1 (52,4–55,9)	2,7	100,0

N – количество измерений; min и max – минимальное и максимальное значения ОА радона, Бк/м<sup>3</sup>; GM – медиана распределения ОА радона (в скобках – 95% доверительный интервал), Бк/м<sup>3</sup>; GSD – геометрическое стандартное отклонение; AM – среднее арифметическое значение ОА радона, Бк/м<sup>3</sup>.

[N – number of measurements; min and max – minimum and maximum radon concentration values, Bq/m<sup>3</sup>; GM – geometric mean (with 95% confidence interval), Bq/m<sup>3</sup>; GSD – geometric standard deviation; AM – arithmetic mean, Bq/m<sup>3</sup>.]

Таблица 4

**Регионы, в которых выявлено хорошее совпадение распределения значений ОА радона с логнормальным**

[Table 4

**Regions of Russia in which radon concentrations conform quite well to a lognormal distribution]**

Код [Code]	Субъект РФ [Region]	N	min	max	GM	GSD	AM
03	Республика Бурятия [The Republic of Buryatia]	886	1	1174	60,7 (56,3–65,4)	3,1	114,1
05	Республика Дагестан [The Republic of Dagestan]	1313	3,8	1414	56,0 (54,1–58,0)	1,9	71,2

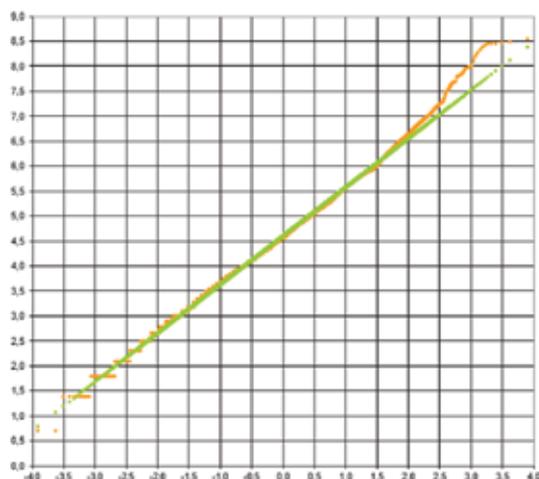
**Research articles**

*Окончание таблицы 4*

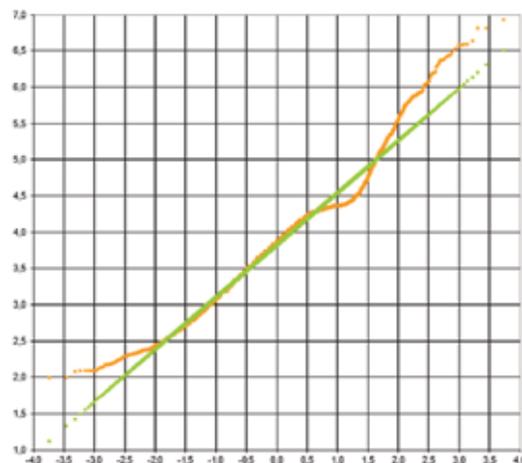
Код [Code]	Субъект РФ [Region]	N	min	max	GM	GSD	AM
17	Республика Тыва [The Tyva Republic]	2319	7,6	2410	103,3 (100,2– 106,6)	2,2	143,0
24	Красноярский край [Krasnoyarsk Krai]	10881	6	1660	47,7 (47,0– 48,4)	2,2	66,6
31	Белгородская область [Belgorod Oblast]	48377	6	1150	39,9 (39,7– 40,2)	1,9	49,4
32	Брянская область [Bryansk Oblast]	14829	1	326,4	23,9 (23,7– 24,0)	1,6	26,7
37	Ивановская область [Ivanovo Oblast]	23385	3,8	1982,2	57,5 (57,0– 58,0)	2,1	80,0
48	Липецкая область [Lipetsk Oblast]	5532	7,3	1016	45,2 (44,3– 46,0)	2,1	60,5
52	Нижегородская область [Nizhny Novgorod Oblast]	2993	6	1600	33,6 (33,0– 34,2)	1,6	40,2
55	Омская область [Omsk Oblast]	8192	6	366	50,4 (50,0– 50,9)	1,5	54,1
56	Оренбургская область [Orenburg Oblast]	4181	2	333,2	45,6 (44,7– 46,5)	2,0	55,1
57	Орловская область [Oryol Oblast]	8650	1,1	1290	29,0 (28,5– 29,5)	2,2	42,3
65	Сахалинская область [Sakhalin Oblast]	348	3	538	20,8 (19,4– 22,2)	1,9	27,6
72	Тюменская область [Tyumen Oblast]	810	2	158	14,4 (13,5– 15,3)	2,4	20,1
74	Челябинская область [Chelyabinsk Oblast]	47363	1,9	54100	51,3 (51,0– 51,6)	1,9	70,5
87	Чукотский АО [Chukotka Autonomous Okrug]	112	2	200	13,6 (11,9– 15,6)	2,1	19,6

N – количество измерений; min и max – минимальное и максимальное значения ОА радона, Бк/м<sup>3</sup>; GM – медиана распределения ОА радона (в скобках – 95% доверительный интервал), Бк/м<sup>3</sup>; GSD – геометрическое стандартное отклонение; AM – среднее арифметическое значение ОА радона, Бк/м<sup>3</sup>.

[N – number of measurements; min and max – minimum and maximum radon concentration values, Bq/m<sup>3</sup>; GM – geometric mean (with 95% confidence interval), Bq/m<sup>3</sup>; GSD – geometric standard deviation; AM – arithmetic mean, Bq/m<sup>3</sup>.]



а) Республика Алтай  
[a] The Altai Republic]



б) Липецкая область  
[b] Lipetsk Oblast]

**Рис. 2.** Примеры Q-Q диаграмм результатов измерений ОА радона в субъектах РФ, отнесенных к первой (а) и второй (б) группам  
**Fig. 2.** Examples of Q-Q plots of radon concentrations (natural logarithms) in the regions of Russia assigned to the a) 1<sup>st</sup> and b) 2<sup>nd</sup> groups]

В третью группу было отнесено 4 субъекта РФ: Кабардино-Балкарская Республика, Республика Марий Эл, Архангельская область и Магаданская область. Соответствующие Q-Q диаграммы представлены на рисунке 3.

В Кабардино-Балкарской Республике (рис. 3а) объем данных крайне невелик (30 измерений), поэтому Q-Q диаграмма пока что не имеет характерного для логнормального распределения вида, однако гипотеза о нормальном характере распределения значений ОА радона не подтверждается с вероятностью 95% результатами расчетов критерия Хи-квадрат, W-критерия Шапиро – Уилка, оценки коэффициентов асимметрии и эксцесса (во всех случаях  $p < 0,05$ ). Дополнительно был рассчитан критерий Колмогорова – Смирнова, на основе которого можно сделать вывод о том, что распределение значений ОА радона в регионе, скорее всего, является логнормальным ( $p = 0,33$ ) и с вероятностью 95% не является нормальным ( $p < 0,05$ ).

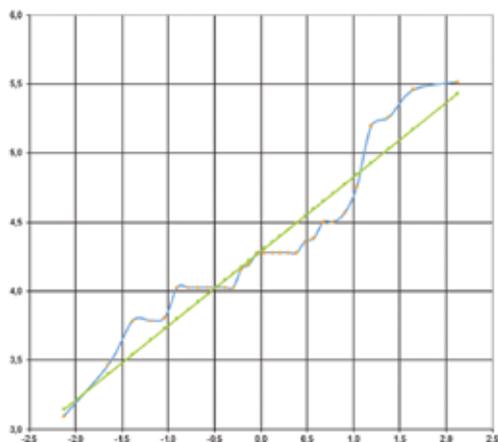
Несмотря на то, что гипотеза о нормальном характере распределения значений ОА радона в Республике Марий Эл (рис. 3б) не подтверждается с вероятностью 95% результатами расчетов критерия Хи-квадрат, оценки коэффициентов асимметрии и эксцесса (во всех случаях  $p = 0$ ), Q-Q диаграмма имеет вид, более подходящий нормальному распределению; на гистограмме частотного распределения видно, что красная огибающая кривая, представляющая нормальное распределение, более точно накрывает основную часть результатов, нежели синяя огибающая кривая, представляющая логнормальное распределение. Однако распределение имеет нехарактерные для нормального распределения тяжелые хвосты,

особенно левый, что также нехарактерно и для логнормального распределения. Установить причины такого характера распределения пока что не удалось.

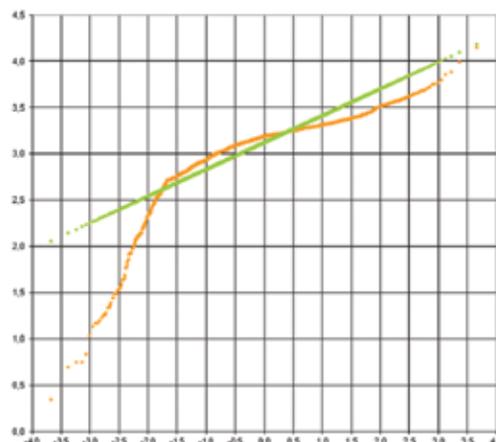
В Архангельской области (рис. 3в) Q-Q диаграмма не имеет обычной для выборок большого объема плавности, на ней обнаруживается множество мелких плато. Это объясняется методическими ошибками при заполнении БД на лабораторном уровне, а именно внесением не результатов отдельных измерений, а множества идентичных значений, полученных усреднением реальных результатов измерений.

В Магаданской области (рис. 3г) объем данных также крайне невелик (23 измерения), поэтому Q-Q диаграмма пока что не имеет характерного для логнормального распределения вида, однако гипотеза о нормальном характере распределения значений ОА радона не подтверждается с вероятностью 95% результатами расчетов критерия Хи-квадрат, W-критерия Шапиро – Уилка, оценки коэффициентов асимметрии и эксцесса (во всех случаях  $p < 0,05$ ). Дополнительно был рассчитан критерий Колмогорова – Смирнова, на основе которого можно сделать вывод о том, что распределение значений ОА радона в регионе, скорее всего, является логнормальным ( $p = 0,23$ ) и с вероятностью 95% не является нормальным ( $p < 0,05$ ).

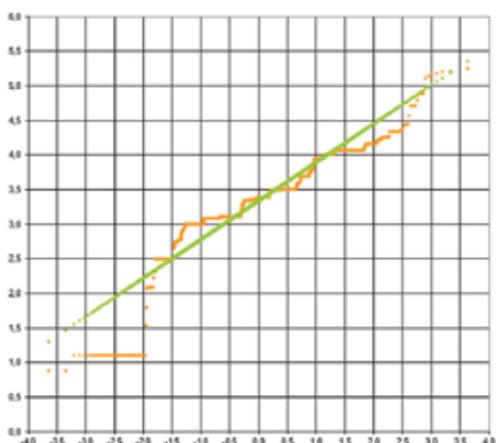
Поскольку, несмотря на визуальное недостаточное совпадение с логнормальным, распределения значений ОА радона в этих субъектах РФ не являются нормальными с вероятностью 95% и, скорее всего, являются логнормальными, для них были рассчитаны те же самые характеристики, что и для остальных субъектов РФ. Результаты приведены в таблице 5.



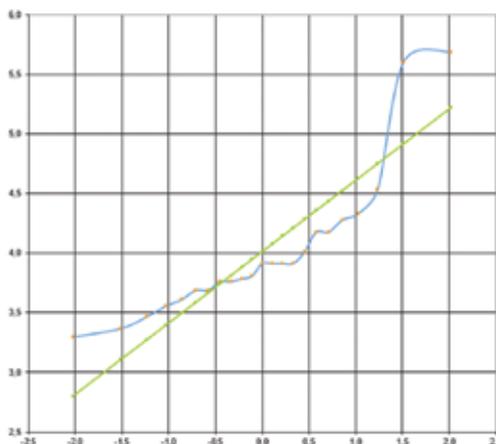
а) Кабардино-Балкарская Республика  
[a) The Kabardino-Balkar Republic]



б) Республика Марий Эл  
[b) The Mari El Republic]



в) Архангельская область  
[c) Arkhangelsk Oblast]



г) Магаданская область  
[d) Magadan Oblast]

**Рис. 3.** Q-Q диаграммы результатов измерений ОА района в четырех субъектах РФ, отнесенных к третьей группе  
**[Fig. 3.** Q-Q plots of radon concentrations (natural logarithms) in four regions of Russia assigned to the 3<sup>rd</sup> group]

Таблица 5

**Регионы, в которых выявлено визуальное недостаточное совпадение распределения значений ОА радона с логнормальным**  
[Table 5

**Regions of Russia in which radon concentrations conform insufficiently (visually) to a lognormal distribution]**

Код [Code]	Субъект РФ [Region]	N	min	max	GM	GSD	AM
07	Кабардино-Балкарская Республика [The Kabardino-Balkar Republic]	30	22	248	72,7 (59,5–88,8)	1,7	84,8
12	Республика Марий Эл [The Mari El Republic]	4088	1,4	63,2	22,5 (22,3–22,7)	1,3	23,3
29	Архангельская область [Arkhangelsk Oblast]	3614	2,4	190	27,8 (27,3–28,3)	1,7	31,7
49	Магаданская область [Magadan Oblast]	23	27	294	55,1 (42,6–71,4)	1,8	69,8

N – количество измерений; min и max – минимальное и максимальные значения ОА радона, Бк/м<sup>3</sup>; GM – медиана распределения ОА радона (в скобках – 95% доверительный интервал), Бк/м<sup>3</sup>; GSD – геометрическое стандартное отклонение; AM – среднее арифметическое значение ОА радона, Бк/м<sup>3</sup>.

[N – number of measurements; min and max – minimum and maximum radon concentration values, Bq/m<sup>3</sup>; GM – geometric mean (with 95% confidence interval), Bq/m<sup>3</sup>; GSD – geometric standard deviation; AM – arithmetic mean, Bq/m<sup>3</sup>.]

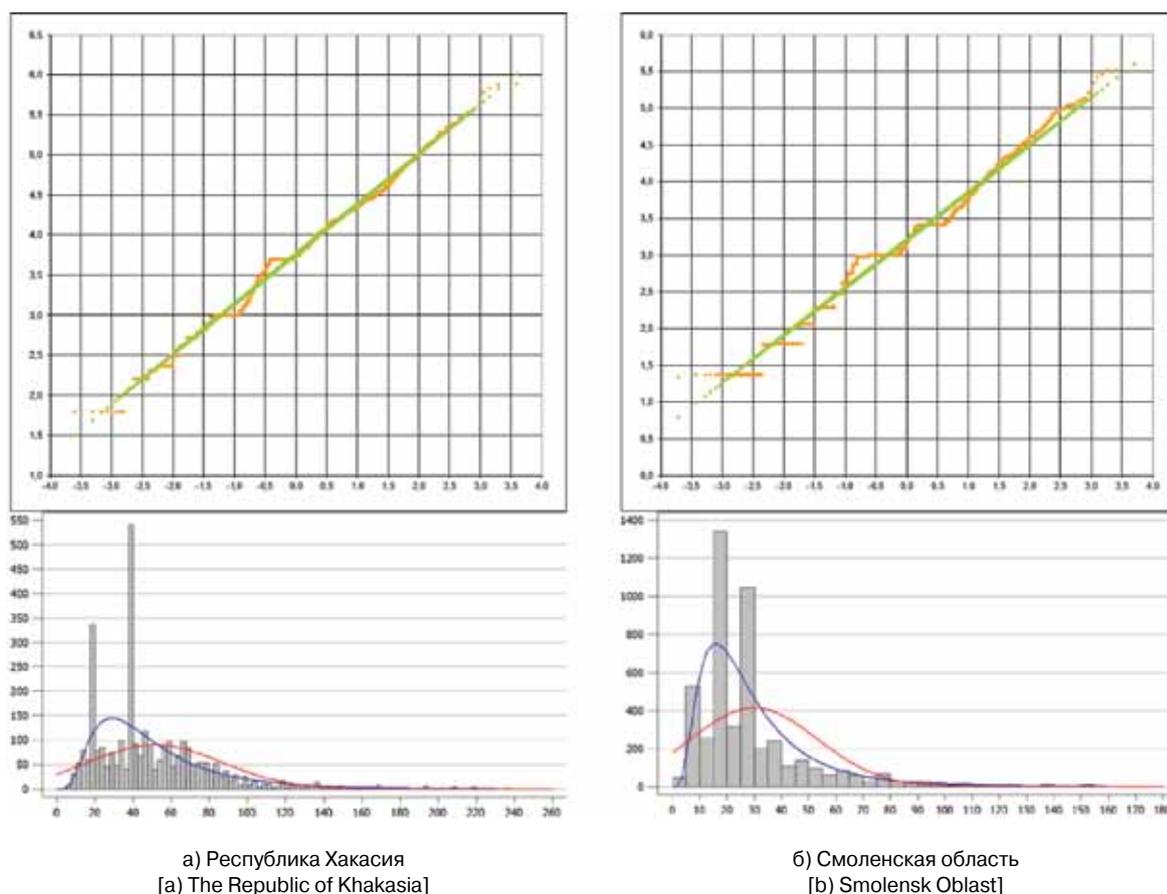
Наиболее многочисленной оказалась четвертая группа субъектов РФ, в которых на Q-Q диаграмме присутствует одно или два промежуточных плато, которые представляют собой значительное количество идентичных результатов измерений (рис. 4). В подавляющем большинстве регионов из данной группы первое плато находится на уровне 3,00 (что соответствует ОА радона в 20 Бк/м<sup>3</sup>); второе плато присутствует в 8 регионах на уровне 3,69 (что соответствует ОА радона в 40 Бк/м<sup>3</sup>) и еще в трех регионах на уровне 3,40 (что соответствует ОА радона в 30 Бк/м<sup>3</sup>).

Появление первого плато на уровне 20 Бк/м<sup>3</sup> связано со значением минимально измеряемой ОА или ЭРОА радона наиболее распространенными в стране типами СИ: РРА-01М различных модификаций (20 Бк/м<sup>3</sup> ОА радона) и РАА-10 (10 Бк/м<sup>3</sup> ЭРОА радона). В протоколах радиационного обследования результаты подобных измерений фигурируют в виде «< 20» в случае измерения ОА радона радиометрами радона РРА-01М различных модификаций и «< 10» в случае измерения ЭРОА радона радиометром аэрозолей РАА-10 в режиме СПЕКТР-5. Для целей санитарно-гигиенической оценки помещений такое представление результатов является приемлемым, однако при заполнении БД такие результаты заносятся в виде точных значений 20 и 10, что является абсолютно некорректным, поскольку реально измеряемая величина может при-

нимать любое значение из интервала 0–20 (в случае измерения ОА радона) или 0–10 (в случае измерения ЭРОА радона). В дальнейшем невозможно отличить такие результаты от измеренных значений, действительно равных 20 и 10 Бк/м<sup>3</sup> для ОА и ЭРОА соответственно, поскольку в текущих версиях ПО отсутствует возможность указать, что результат измерения не превышает нижней границы диапазона измерения (НГДИ) конкретного типа СИ, который также невозможно указать в качестве дополнительной характеристики результата измерения.

Данная методическая проблема особенно актуальна для субъектов РФ со стабильно невысоким уровнем содержания радона в воздухе помещений, который на самом деле может оказаться ниже указанной минимально измеряемой ОА или ЭРОА радона. В идеальном случае следовало бы дать рекомендацию использовать типы СИ с меньшей НГДИ, тем более что в продаже есть приборы, имеющие действующее свидетельство об утверждении типа СИ, у которых значение минимально измеряемой ОА (или ЭРОА) радона не превышает 1 Бк/м<sup>3</sup>. Однако обсуждение реалистичности этого варианта, имеющего явно выраженную экономическую составляющую, следует оставить за рамками данной работы.

Появление второго плато в восьми субъектах РФ (Республика Хакасия, Краснодарский край, Ставропольский край, Московская область, Пензенская



**Рис. 4.** Q-Q диаграммы и гистограммы частотного распределения результатов измерений ОА радона, на которых присутствуют два плато (пика): на уровне 3,00 (20 Бк/м<sup>3</sup>) и а) 3,69 (40 Бк/м<sup>3</sup>) или б) 3,40 (30 Бк/м<sup>3</sup>)

**[Fig. 4.** Q-Q plots and frequency distribution histograms of radon concentrations with two plateaus (peaks) detected: at 3.00 (20 Bq/m<sup>3</sup>) and а) 3.69 (40 Bq/m<sup>3</sup>) or б) 3.40 (30 Bq/m<sup>3</sup>)]

область, Пермский край, Саратовская область, Тверская область) на уровне  $40 \text{ Бк/м}^3$  (рис. 4а) связано предположительно с ошибочным занесением результатов мгновенных измерений ОА радону в графу ЭРОА радона. Это предположение уже было подтверждено при общении с лицами, ответственными за РБДОПИ во ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии» в некоторых субъектах РФ. Кроме 8 вышеназванных регионов, где плато на уровне  $40 \text{ Бк/м}^3$  четко идентифицируется на Q-Q диаграмме, подозрительные пики в  $40 \text{ Бк/м}^3$  отмечены на гистограммах в следующих регионах: Республика Татарстан, Чувашская Республика, Приморский край, Орловская, Самарская, Томская области, но однозначно отнести их появление к ошибкам операторов на данный момент невозможно.

Появление второго плато в трех субъектах РФ (Республика Калмыкия, Смоленская и Томская области) на уровне  $30 \text{ Бк/м}^3$  (см. рис. 4б) связано предположительно с еще более грубой ошибкой операторов, заносивших результаты измерений в БД, заключающейся в том, что в качестве результата измерения ЭРОА радона были занесены результаты измерения ОА, полученные квазиинтегральными методами (пассивная сорбция на активированном угле), для которых характерным значением минимально измеряемой ОА радона является  $15 \text{ Бк/м}^3$ .

В трех субъектах РФ на гистограммах частотного распределения были обнаружены выбивающиеся из логнормального распределения пики в интервалах значений, которые не связаны с минимально измеряемыми значениями каких-либо типов СИ:  $65\text{--}70 \text{ Бк/м}^3$  в Воронежской области,  $70\text{--}80 \text{ Бк/м}^3$  – в Липецкой и  $60\text{--}70$  – в Омской. Причина появления этих пиков на данный момент неясна. Возможно, они связаны с проведением большого количества измерений в рамках детального обследования зданий, расположенных на небольшом участке территории, имеющем определенные геолого-геофизические характеристики.

Очевидно, что установление конкретных причин искажения Q-Q диаграмм является довольно сложной задачей, требующей в большинстве случаев прямых консультаций с лицами, ответственными за ведение БД на лабораторном или региональном уровнях. На данный момент эта работа продолжается. В подавляющем большинстве регионов основную долю записей, признанных на этапе валидации недействительными, составили результаты квазиинтегральных измерений. Принимая во внимание уже выявленные типы ошибок операторов, возможно, что нижняя часть Q-Q диаграмм в некоторых регионах улучшится, если в качестве уровня валидации квазиинтегральных измерений использовать не  $15 \text{ Бк/м}^3$ , а  $1 \text{ Бк/м}^3$  – т.е. допустить, что туда заносятся результаты мгновенных измерений ОА радона (например, в Хабаровском крае, где доля недействительных значений оказалась максимальной –  $20,16\%$ ). Все эти факты говорят о необходимости повышения квалификации лиц, ответственных за ведение БД на уровне лабораторий и РБДОПИ в субъектах РФ, а также о необходимости дополнительной методической поддержки со стороны ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева.

Поскольку одной из подзадач данной работы являлась проверка соответствия распределений значений ОА радона логнормальному закону, а «ошибочные» плато значительно искажают Q-Q диаграмму, возникла необхо-

димость устранить плато, не затрагивая при этом остальные результаты, и восстановить таким образом форму распределений.

Для восстановления неизвестной функции плотности распределения вероятности разработан ряд методов и алгоритмов; к числу наиболее часто используемых относится метод гистограмм [31]. В нашем случае проблема с его использованием заключается в том, что определенная часть результатов измерений по сути завышена и должна быть представлена в виде «< НГДИ». Для оценки параметров распределения физических величин, результаты измерений которых часто оказываются ниже предела обнаружения, также разработан ряд методов, объединенных общим термином «анализ цензурированных данных» (CDA – censored data analysis), рекомендованных к применению такими международными организациями, как Европейское агентство по безопасности продуктов питания [32] и Всемирная организация здравоохранения [33]. В нашем случае применение этих методов напрямую также невозможно, поскольку результаты измерений, не превышающие НГДИ, однозначно не идентифицируются в БД. Кроме того, в БД присутствуют подобные результаты, полученные с помощью различных типов СИ, и для каждого из них должна быть четко указана соответствующая НГДИ.

Учитывая вышесказанное, было протестировано два метода устранения плато на Q-Q диаграммах. Первый заключался в простом отсечении результатов измерений ОА радона в  $20$  и  $40 \text{ Бк/м}^3$  ( $30 \text{ Бк/м}^3$  в случае Смоленской и Томской областей) в столбцах мгновенных измерений. Однако после процедуры отсечения по провалу на гистограмме частотного распределения и ходу огибающей логнормальной кривой было заметно, что теряется определенное количество результатов, которые являются реальными значениями. Наиболее заметен этот провал был на гистограммах частотного распределения в семи субъектах РФ (Республика Татарстан, Краснодарский край, Воронежская, Московская, Самарская области, Москва, Ханты-Мансийский АО – Югра). Для восстановления формы распределения (устранения провала) и возврата части данных, являющихся реальными значениями, в массив для дальнейших расчетов параметров распределений был произведен расчет количества значений, которое должно быть в выборке, с использованием кумулятивной функции распределения (с параметрами, полученными после отсечения).

Второй метод был, с одной стороны, упрощенным вариантом первого, но с другой стороны, упрощение заключалось в том, что был исключен довольно дискуссионный прием – прямое отсечение части результатов измерений, не являющихся реальными значениями. Вместо этого расчет количества значений, которое должно быть в выборке на уровень устраняемых плато, производился с использованием кумулятивной функции распределения с параметрами, полученными по исходному массиву данных.

Процедура устранения плато на Q-Q диаграмме слабо влияет на величину геометрического стандартного отклонения: среднее по всем субъектам РФ увеличение составило  $0,1$ . Причем в отдельных субъектах РФ наблюдается не только увеличение, но и уменьшение этого параметра, а в ряде случаев он остается неизменным. Однако второй метод в целом дает меньшее увеличения данного параметра.

После применения вышеописанных методов к массивам данных во всех 39 субъектах РФ из четвертой группы на Q-Q диаграммах отмечается хорошее или практически идеальное совпадение распределения значений ОА радона с логнормальным (рис. 5), что говорит о правильности описанного подхода к устранению плато на Q-Q диаграмме и восстановлению формы распределения. Характеристики распределений, рассчитанные по выборкам, полученным первым и вторым методом, отличались между собой незначительно (в пределах 1 Бк/м<sup>3</sup>), однако второй метод был признан более оптимальным за счет большей простоты реализации, большей стабильности

геометрического стандартного отклонения, меньшего влияния «экспертного» фактора и меньшей консервативности получаемых характеристик распределений. В таблице 6 приведены субъекты РФ из четвертой группы и соответствующие характеристики распределений, полученные после устранения плато на Q-Q диаграммах и восстановления формы распределения вторым методом.

Для всех 78 проанализированных субъектов РФ гипотеза о нормальном характере распределения значений ОА радона не подтверждается с вероятностью 95% результатами расчетов критерия Хи-квадрат, W-критерия Шапиро – Уилка, оценки коэффициентов асимметрии и эксцесса (во всех случаях  $p < 0,05$ ).

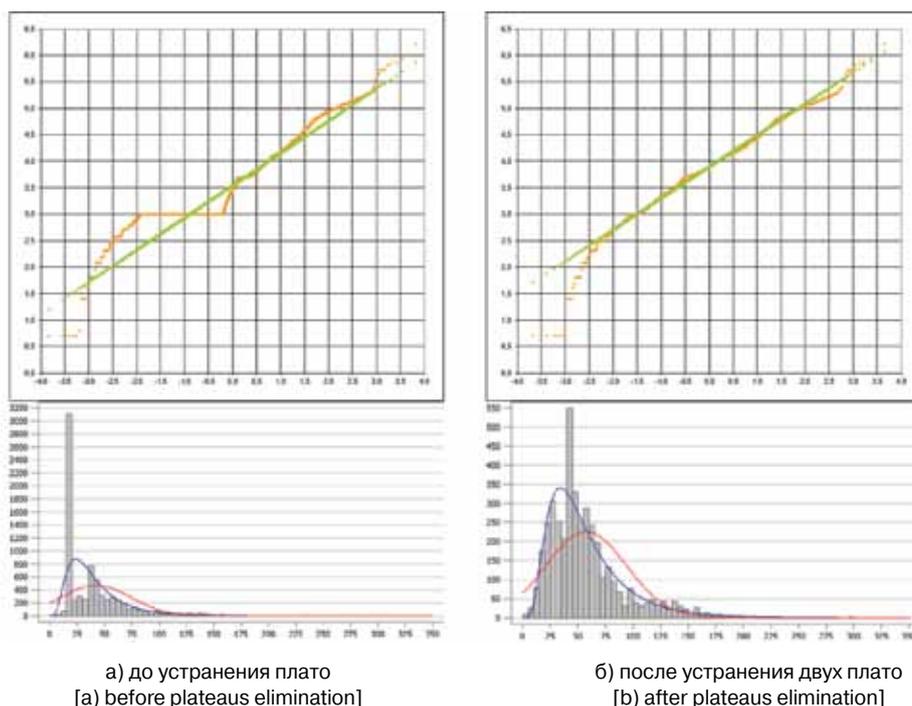


Рис. 5. Q-Q диаграммы и гистограммы частотного распределения результатов измерений ОА радона в Пермском крае [Fig. 5. Q-Q plots and frequency distribution histograms of radon concentrations in Perm Krai]

Таблица 6

Регионы с устраненным плато на Q-Q диаграмме, в которых получено хорошее или практически идеальное совпадение распределения значений ОА радона с логнормальным

[Table 6

Regions of Russia in which radon concentrations conform almost perfect or quite well to a lognormal distribution after plateaus elimination]

Код [Code]	Субъект РФ [Region]	N	min	max	GM	GSD	AM
02	Республика Башкортостан [The Republic of Bashkortostan]	4625	2,6	1006	45,8 (45,0–46,6)	1,8	57,1
08	Республика Калмыкия [The Republic of Kalmykia]	1893	2	1042	72,7 (70,2–75,3)	2,2	99,8
10	Республика Карелия [The Republic of Karelia]	2687	2	652	35,2 (34,5–35,9)	1,7	40,5
13	Республика Мордовия [The Republic of Mordovia]	1004	4	197,6	47,3 (45,1–49,7)	2,2	60,2
14	Республика Саха (Якутия) [The Republic of Sakha (Yakutia)]	3080	1	5622	38,7 (37,4–40,0)	2,6	60,9

**Research articles**

*Продолжение таблицы 6*

Код [Code]	Субъект РФ [Region]	N	min	max	GM	GSD	AM
16	Республика Татарстан [The Republic of Tatarstan]	28239	2	202	23,8 (23,7–23,9)	1,6	26,4
19	Республика Хакасия [The Republic of Khakasia]	2482	6	360	46,3 (45,1–47,5)	1,9	56,7
21	Чувашская Республика [The Chuvash Republic]	10255	2	1600	38,3 (37,9–38,7)	1,8	45,0
22	Алтайский край [Altai Krai]	26477	6	640	57,4 (57,1–57,7)	1,5	62,7
23	Краснодарский край [Krasnodar Krai]	13280	2	1200	27,0 (26,8–27,2)	1,6	30,0
25	Приморский край [Primorsky Krai]	4294	8	208,4	41,3 (40,7–41,9)	1,6	46,5
26	Ставропольский край [Stavropol Krai]	16641	2	7530	69,6 (68,8–70,5)	2,2	102,5
27	Хабаровский край [Khabarovsk Krai]	3184	8	560,6	36,1 (35,5–36,7)	1,6	40,9
33	Владимирская область [Vladimir Oblast]	1139	9	211	39,3 (37,9–40,7)	1,9	47,5
34	Волгоградская область [Volgograd Oblast]	1741	3	79	24,1 (23,7–24,6)	1,5	25,8
35	Вологодская область [Vologda Oblast]	2194	1,6	776	49,2 (48,1–50,3)	1,7	55,4
36	Воронежская область [Voronezh Oblast]	15197	1,4	496	41,1 (40,8–41,5)	1,7	47,6
38	Иркутская область [Irkutsk Oblast]	10759	1	20300	56,1 (55,3–56,9)	2,1	90,0
39	Калининградская область [Kaliningrad Oblast]	7084	2	1146,6	44,9 (44,3–45,5)	1,8	55,0
41	Камчатский край [Kamchatka Krai]	1087	10	120	28,2 (27,5–28,8)	1,5	30,6
47	Ленинградская область [Leningrad Oblast]	13913	2	930	41,9 (41,3–42,5)	2,3	60,0
50	Московская область [Moscow Oblast]	6247	2	278	36,8 (36,4–37,3)	1,7	42,6
51	Мурманская область [Murmansk Oblast]	448	6	82	28,1 (27,1–29,1)	1,5	30,1
53	Новгородская область [Novgorod Oblast]	2378	1	276	32,6 (31,7–33,6)	2,1	41,4
58	Пензенская область [Penza Oblast]	4892	2	422	20,9 (20,5–21,3)	1,9	25,8
59	Пермский край [Perm Krai]	4128	2	492	48,5 (47,6–49,4)	1,8	57,5
60	Псковская область [Pskov Oblast]	302	20,5	1038	43,6 (40,2–47,2)	2,0	58,3
62	Рязанская область [Ryazan Oblast]	8098	2	1044	39,0 (38,2–39,7)	2,3	54,5
63	Самарская область [Samara Oblast]	26789	2	750	33,8 (33,6–34,1)	1,8	40,1
64	Саратовская область [Saratov Oblast]	1241	4	510	30,0 (29,1–30,9)	1,7	36,2
66	Свердловская область [Sverdlovsk Oblast]	12008	2	998	51,1 (50,5–51,7)	1,9	64,7

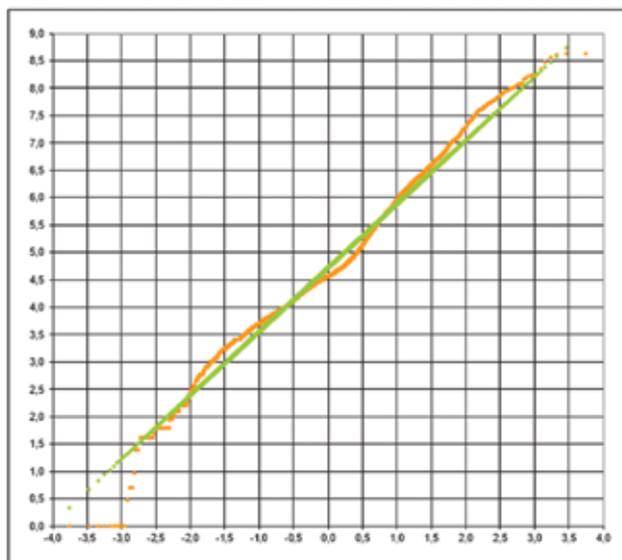
Код [Code]	Субъект РФ [Region]	N	min	max	GM	GSD	AM
67	Смоленская область [Smolensk Oblast]	3422	3,8	268	24,4 (23,8–25,0)	2,1	32,3
69	Тверская область [Tver Oblast]	4721	1	358	37,1 (36,4–37,7)	1,8	44,2
70	Томская область [Tomsk Oblast]	7955	2	756	35,6 (35,4–35,9)	1,3	37,1
76	Ярославская область [Yaroslavl Oblast]	8719	2	1060	33,2 (32,7–33,7)	2,1	41,6
77	Москва [Moscow]	8991	2	890	26,2 (25,8–26,5)	1,8	31,2
78	Санкт-Петербург [Saint-Petersburg]	52350	2	4390	41,1 (41,0–41,3)	1,5	45,6
86	Ханты-Мансийский АО – Югра [Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra]	4096	2	340	26,0 (25,5–26,5)	1,9	32,5
89	Ямало-Ненецкий АО [Yamalo-Nenets Autonomous Okrug]	1386	1	372	21,1 (19,9–22,4)	3,2	43,4

N – количество измерений; min и max – минимальное и максимальное значения ОА радона, Бк/м<sup>3</sup>; GM – медиана распределения ОА радона (в скобках – 95% доверительный интервал), Бк/м<sup>3</sup>; GSD – геометрическое стандартное отклонение; AM – среднее арифметическое значение ОА радона, Бк/м<sup>3</sup>.

[N – number of measurements; min and max – minimum and maximum radon concentration values, Bq/m<sup>3</sup>; GM – geometric mean (with 95% confidence interval), Bq/m<sup>3</sup>; GSD – geometric standard deviation; AM – arithmetic mean, Bq/m<sup>3</sup>]

Анализ Q-Q диаграмм также позволил графически оценить уровень, до которого ОА радона точно следует логнормальному закону, а выше которого начинают наблюдаться отклонения. Медианное значение этого уровня составило 148 Бк/м<sup>3</sup> при диапазоне 55–4915 Бк/м<sup>3</sup>, среднее арифметическое составило 175 Бк/м<sup>3</sup>. Это в целом согласуется с данными других авторов [10] и подтверждает тот факт, что ОА радона точно следу-

ет логнормальному закону в том случае, когда данные получены на территории одной геологической формации [34]: максимальное значение порогового уровня в 4915 Бк/м<sup>3</sup> получено в Забайкальском крае (рис. 6), на территории которого заметно преобладают горные области и для которого характерны высокие, по сравнению с остальными субъектами РФ, средние значения ОА радона.



**Рис. 6.** Q-Q диаграмма результатов измерений ОА радона в Забайкальском крае: распределение имеет логнормальный характер до уровня в 4915 Бк/м<sup>3</sup>

**[Fig. 6.** Q-Q plot of radon concentrations in Zabaykalsky Krai: values conform lognormal distribution very well up to about 4915 Bq/m<sup>3</sup>]

### Заключение

За 2001–2017 гг. в ФБДОПИ был накоплен гигантский массив данных о содержании радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий в 78 субъектах РФ, представляющий собой результаты измерений ОА и ЭРОА радона, полученные всеми методами (мгновенными, квазиинтегральными и интегральными). В данной работе впервые был проведен комплексный анализ хранящихся в ФБДОПИ результатов измерений с целью проверки соответствия распределений ОА радона логнормальному закону. В результате применения целого ряда методов анализа данных было установлено, что в 74 субъектах РФ распределения значений ОА радона, в целом, следуют логнормальному закону до определенного уровня, максимальное значение которого составило 4915 Бк/м<sup>3</sup>. Для всех 78 проанализированных субъектов РФ были рассчитаны параметры распределений (медиана с 95% доверительным интервалом, геометрическое стандартное отклонение и среднее арифметическое). В дальнейшем полученные медианные значения могут быть использованы для расчета различных показателей риска для здоровья населения субъектов РФ при облучении радоном [35, 36]. Следует, однако, отметить, что полученные для части субъектов РФ параметры описывают так называемое смешанное распределение [37], составленное из распределений результатов измерений, полученных разными методами. Тем не менее, вследствие самой идеологии ФБДОПИ как массива результатов рутинных измерений, получить надежную оценку параметров отдельных распределений на данный момент не представляется возможным.

Результаты исследования также показывают, что использование при расчете доз внутреннего облучения населения радоном средних арифметических значений является некорректным и приводит к завышению доз в среднем в 1,3 раза, а в ряде случаев – в 2,1 раза. Исходя из этого, становится очевидным, что разработка нового комплекса ПО для заполнения БД результатов измерений и генерации формы № 4-ДОЗ, а также внесение изменений в соответствующие инструктивно-методические документы, вне всяких сомнений, является актуальнейшей задачей.

*Автор выражает признательность В.С. Репину (ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева) за ценные замечания, а также двум рецензентам за полезные комментарии.*

### Литература

- Барковский, А.Н. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2016 году: информационный сборник / А.Н. Барковский, Н.К. Барышков, Г.Я. Брук, Б.Ф. Воробьев, Т.А. Кормановская, Л.В. Репин, И.К. Романович, Т.Н. Титова, В.С. Степанов, А.Г. Цовьянов, А.Г. Сивенков, В.Е. Журавлева. – СПб., 2017. – 78 с.
- Кононенко, Д.В. Оценка радиационного риска для населения Санкт-Петербурга при облучении радоном / Д.В. Кононенко // Радиационная гигиена. – 2013. – Т. 6, № 1. – С. 31–37.
- Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. Утвержденные типы средств измерений (сведения представлены по состоянию на 01.11.2018): <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4> (дата обращения: 23.01.2019)
- Кононенко, Д.В. Типичные ошибки операторов при внесении результатов измерений содержания радона в воздухе помещений в банк данных лабораторий радиационного контроля «ФФ-4» / Д.В. Кононенко, Т.А. Кормановская // Материалы международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы радиационной гигиены», Санкт-Петербург, 23-24 октября 2018 г. – СПб., 2018. – С. 176–178.
- Embrechts P., Klüppelberg C., Mikosch T. Modelling Extremal Events for Insurance and Finance. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 1997. 648 p. ISBN 978-3-642-33483-2 (eBook).
- Limpert E., Stahel W.A., Abbt M. Log-Normal Distributions Across the Sciences: Keys and Clues. BioScience. 2001 May;51(5):341–52.
- Микляев, П.С. Научные основы оценки потенциальной радоноопасности платформенных территорий: дисс. ... докт. г.-м. наук / П.С. Микляев. – М., 2015. – 307 с.
- Ott W.R. A physical explanation of the lognormality of pollutant concentrations. J Air Waste Manage Assoc. 1990 Oct;40(10):1378–83.
- Hattis D.B., Burmaster D.E. Assessment of variability and uncertainty distributions for practical risk assessments. Risk Anal. 1994;14(5):713–30.
- Daraktchieva Z., Miles J.C., McColl N. Radon, the lognormal distribution and deviation from it. J Radiol Prot. 2014 Mar;34(1):183–90.
- Cohen B.L. A national survey of <sup>222</sup>Rn in U.S. homes and correlating factors. Health Phys. 1986 Aug;51(2):175–83.
- Nero A.V., Schwehr M.B., Nazaroff W.W., Revzan K.L. Distribution of airborne radon-222 concentrations in U.S. homes. Science. 1986 Nov;234(4779):992–7.
- White S.B., Bergsten J.W., Alexander B.V., Rodman N.F., Phillips J.L. Indoor <sup>222</sup>Rn concentrations in a probability sample of 43,000 houses across 30 states. Health Phys. 1992 Jan;62(1):41–50.
- Marcinowski F., Lucas R.M., Yeager W.M. National and regional distributions of airborne radon concentrations in U.S. homes. Health Phys. 1994 Jun;66(6):699–706.
- Miles J.C.H. Mapping the proportion of the housing stock exceeding a radon reference level. Radiat Prot Dosimetry. 1994 Dec;56(1-4):207–10.
- Miles J. Mapping radon-prone areas by lognormal modelling of house radon data. Health Phys. 1998 Mar;74(3):370–8.
- Kim C.K., Lee S.C., Lee D.M., Chang B.U., Rho B.H., Kang H.D. Nationwide survey of radon levels in Korea. Health Phys. 2003 Mar;84(3):354–60.
- Hámori K., Tóth E., Losonci A., Minda M. Some remarks on the indoor radon distribution in a country. Appl Radiat Isot. 2006 Aug;64(8):859–63.
- Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Volume I: Sources. Annex B: Exposures from natural radiation sources. New York: United Nations; 2000. 76 p. ISBN 92-1-142238-8.
- Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume II: Scientific Annexes C, D and E. Annex E: Sources-to-effects assessment for radon in homes and workplaces. New York: United Nations; 2009. 142 p. ISBN 978-92-1-142270-2.
- Andersen C.E., Ulbak K., Damkjaer A., Kirkegaard P., Gravesen P. Mapping indoor radon-222 in Denmark: design and test of the statistical model used in the second nationwide survey. Sci Total Environ. 2001 May 14;272(1-3):231–41.
- Murphy P., Organo C. A comparative study of lognormal, gamma and beta modelling in radon mapping with recommendations regarding bias, sample sizes and the treatment of outliers. J Radiol Prot. 2008 Sep;28(3):293–302.
- Tuia D., Kanevski M. Indoor radon distribution in Switzerland: lognormality and Extreme Value Theory. J Environ Radioact. 2008 Apr;99(4):649–57.

24. Bossew P. Radon: exploring the log-normal mystery. *J Environ Radioact.* 2010 Oct;101(10):826–34.
25. Kies A., Feider M., Biell A., Rowlinson L. Radon survey in the Grand-Duchy of Luxembourg. Indoor measurements related to house features, soil, geology and environment. *Environ. Int.* 1996 Jan;22:805–8.
26. StatSoft, Inc. Электронный учебник по статистике: [http://statsoft.ru/home/textbook/glossary/gloss\\_n.html](http://statsoft.ru/home/textbook/glossary/gloss_n.html) (дата обращения: 23.01.2019)
27. Цыплаков, А. Мини-словарь англоязычных эконометрических терминов, часть 3 / А. Цыплаков // *Квантиль.* – 2014. – № 12. – С. 45–51.
28. Gunby J.A., Darby S.C., Miles J.C., Green B.M., Cox D.R. Factors affecting indoor radon concentrations in the United Kingdom. *Health Phys.* 1993 Jan;64(1):2–12.
29. National and Regional Surveys of Radon Concentration in Dwellings. Review of Methodology and Measurement Techniques. IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications Series No. 33 (IAEA/AQ/33). Vienna: International Atomic Energy Agency; 2013. 35 p. ISSN 2074–7659.
30. Measurement and reporting of radon exposures. ICRU Report No. 88. *Journal of the ICRU* 12 (2). Oxford University Press; 2012. 191 p.
31. Сызранцев, В.Н. Адаптивные методы восстановления функции плотности распределения вероятности / В.Н. Сызранцев, Я.П. Невелев, С.Л. Голофаст // *Известия вузов. Машиностроение.* – 2006. – № 12. – С. 3–11.
32. European Food Safety Authority. Management of left-censored data in dietary exposure assessment of chemical substances. Scientific report of EFSA. *EFSA Journal* 2010 Jun;8(3):1557–1653.
33. GEMS/Food-EURO Second Workshop on Reliable Evaluation of Low-Level Contamination of Food. Report on a Workshop in the Frame of GEMS/Food-EURO (with Addendum, January 2013); 1995 May 26-27; Kulmbach, Federal Republic of Germany. 10 p.
34. Cinelli G., Tondeur F. Log-normality of indoor radon data in the Walloon region of Belgium. *J Environ Radioact.* 2015 May;143:100–9.
35. Кононенко, Д.В. Оценка риска при облучении радоном для населения субъектов Российской Федерации на основе данных радиационно-гигиенического паспорта территории / Д.В. Кононенко, Т.А. Кормановская // *Радиационная гигиена.* – 2015. – Т. 8, № 4. – С. 15–22.
36. Кононенко, Д.В. Дифференцированный подход к оценке риска для здоровья населения при облучении радоном / Д.В. Кононенко // *Радиационная гигиена.* – 2017. – Т. 10, № 1. – С. 76–83.
37. Дубнер, П.Н. Англо-русский статистический глоссарий: основные понятия: <http://masters.donntu.org/2002/fvti/spivak/library/book2/book2.htm> (дата обращения: 23.01.2019)

Поступила: 24.01.2019 г.

**Кононенко Дмитрий Викторович** – научный сотрудник лаборатории дозиметрии природных источников Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: d.kononenko@niirg.ru

**Для цитирования:** Кононенко Д.В. Анализ распределений значений объемной активности радона в воздухе помещений в субъектах Российской Федерации // *Радиационная гигиена.* – 2019. – Т. 12, №1. – С. 85–103. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-85-103

## Analysis of distributions of indoor radon concentrations in the regions of the Russian Federation

Dmitry V. Kononenko

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

*During 2001–2017 more than 800 thousand records containing the results of measurements of radon concentration taken in 78 regions of Russia were accumulated in the Federal databank of radiation doses to the population of the Russian Federation. The paper presents the procedure and results of the first data analysis carried out to check the conformity of radon concentrations in the regions of Russia with the lognormal distribution and to calculate the parameters of these distributions. The procedure included verification and validation of data, plotting the frequency distribution histograms and Q-Q plots (normal probability plots) and the use of some methods of elimination of plateaus on the Q-Q plots and the distribution recovery. As a result,*

**Dmitry V. Kononenko**

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

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

*in 74 of 78 analyzed regions radon concentrations conform quite well or almost perfect to a lognormal distribution up to a certain level (this level ranged from 55 to 4915 Bq/m<sup>3</sup>). For all 78 regions geometric means with 95% confidence intervals, geometric standard deviations and arithmetic means were calculated. It should be noted that due to the fact that the Federal databank is a database containing results of measurements taken with different techniques (instant measurements, charcoal canisters, radon monitors and etched track detectors), the lognormal distributions for most regions are in fact contaminated distributions, and currently it is impossible to calculate the parameters of separate distributions that form the mixture. The results show that dose assessment based on arithmetic means could lead to an overestimation of the doses from radon up to 2.1 times compared to that based on geometric means. The calculated medians can also be used for risk assessment purposes.*

**Key words:** radon, concentration, verification, validation, data analysis, lognormal distribution, distribution parameters, Q-Q plot, distribution recovery, federal databank.

## References

- Barkovsky A.N., Baryshkov N.K., Bruk G.Ya. Doses of exposure of the population of the Russian Federation in 2016: Informational digest. St.Petersburg; 2017. 78 p. (In Russian)
- Kononenko D.V. Risk assessment for the population of Saint-Petersburg from residential exposure to radon. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2013;6(1):31–7. (In Russian)
- Federal Information Fund for ensuring the uniformity of measurements. Approved types of measuring instruments (information is presented as of 01.11.2018). – Available from: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4> (Accessed: 23.01.2019) (In Russian)
- Kononenko D.V., Kormanovskaya T.A. Typical mistakes made by users while entering indoor radon measurements results into the laboratory database “FF-4”. In: Current issues of radiation hygiene. Materials of the international scientific and practical conference; 2018 Oct 23–24; St.Petersburg, Russia. St.Petersburg; 2018. P. 176–178. (In Russian)
- Embrechts P., Klüppelberg C., Mikosch T. Modelling Extremal Events for Insurance and Finance. Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 1997. 648 p. ISBN 978-3-642-33483-2 (eBook).
- Limpert E., Stahel W.A., Abbt M. Log-Normal Distributions Across the Sciences: Keys and Clues. BioScience. 2001 May;51(5):341–52.
- Miklyayev P.S. Scientific basis for assessing the potential radon hazard of platform areas [dissertation]. Moscow; 2015. 307 p. (In Russian)
- Ott W.R. A physical explanation of the lognormality of pollutant concentrations. J Air Waste Manage Assoc. 1990 Oct;40(10):1378–83.
- Hattis D.B., Burmaster D.E. Assessment of variability and uncertainty distributions for practical risk assessments. Risk Anal. 1994;14(5):713–30.
- Daraktchieva Z., Miles J.C., McColl N. Radon, the lognormal distribution and deviation from it. J Radiol Prot. 2014 Mar;34(1):183–90.
- Cohen B.L. A national survey of <sup>222</sup>Rn in U.S. homes and correlating factors. Health Phys. 1986 Aug;51(2):175–83.
- Nero A.V., Schwehr M.B., Nazaroff W.W., Revzan K.L. Distribution of airborne radon-222 concentrations in U.S. homes. Science. 1986 Nov;234(4779):992–7.
- White S.B., Bergsten J.W., Alexander B.V., Rodman N.F., Phillips J.L. Indoor <sup>222</sup>Rn concentrations in a probability sample of 43,000 houses across 30 states. Health Phys. 1992 Jan;62(1):41–50.
- Marcinowski F., Lucas R.M., Yeager W.M. National and regional distributions of airborne radon concentrations in U.S. homes. Health Phys. 1994 Jun;66(6):699–706.
- Miles J.C.H. Mapping the proportion of the housing stock exceeding a radon reference level. Radiat Prot Dosimetry. 1994 Dec;56(1-4):207–10.
- Miles J. Mapping radon-prone areas by lognormal modelling of house radon data. Health Phys. 1998 Mar;74(3):370–8.
- Kim C.K., Lee S.C., Lee D.M., Chang B.U., Rho B.H., Kang H.D. Nationwide survey of radon levels in Korea. Health Phys. 2003 Mar;84(3):354–60.
- Hámori K., Tóth E., Losonci A., Minda M. Some remarks on the indoor radon distribution in a country. Appl Radiat Isot. 2006 Aug;64(8):859–63.
- Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Volume I: Sources. Annex B: Exposures from natural radiation sources. New York: United Nations; 2000. 76 p. ISBN 92-1-142238-8.
- Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume II: Scientific Annexes C, D and E. Annex E: Sources-to-effects assessment for radon in homes and workplaces. New York: United Nations; 2009. 142 p. ISBN 978-92-1-142270-2.
- Andersen C.E., Ulbak K., Damkjaer A., Kirkegaard P., Gravesen P. Mapping indoor radon-222 in Denmark: design and test of the statistical model used in the second nationwide survey. Sci Total Environ. 2001 May 14;272(1-3):231–41.
- Murphy P., Organo C. A comparative study of lognormal, gamma and beta modelling in radon mapping with recommendations regarding bias, sample sizes and the treatment of outliers. J Radiol Prot. 2008 Sep;28(3):293–302.
- Tuia D., Kanevski M. Indoor radon distribution in Switzerland: lognormality and Extreme Value Theory. J Environ Radioact. 2008 Apr;99(4):649–57.
- Bossew P. Radon: exploring the log-normal mystery. J Environ Radioact. 2010 Oct;101(10):826–34.
- Kies A., Feider M., Biell A., Rowlinson L. Radon survey in the Grand-Duchy of Luxembourg. Indoor measurements related to house features, soil, geology and environment. Environ. Int. 1996 Jan;22:805–8.
- StatSoft, Inc. Electronic textbook on statistics. – Available from: [http://statsoft.ru/home/textbook/glossary/gloss\\_n.html](http://statsoft.ru/home/textbook/glossary/gloss_n.html) (Accessed: 23.01.2019) (In Russian)
- Tsyplakov A. A mini-dictionary of English econometric terminology III. Quantile. 2014;12:45–51. (In Russian)
- Gunby J.A., Darby S.C., Miles J.C., Green B.M., Cox D.R. Factors affecting indoor radon concentrations in the United Kingdom. Health Phys. 1993 Jan;64(1):2–12.
- National and Regional Surveys of Radon Concentration in Dwellings. Review of Methodology and Measurement Techniques. IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications Series No. 33 (IAEA/AQ/33). Vienna: International Atomic Energy Agency; 2013. 35 p. ISSN 2074–7659.
- Measurement and reporting of radon exposures. ICRU Report No. 88. Journal of the ICRU 12 (2). Oxford University Press; 2012. 191 p.
- Syzrantsev V.N., Nevelev Ya.P., Golofast S.L. Adaptive methods for recovering the probability density function. Izvestiya vuzov. Mashinostroyeniye = News of universities. Engineering. 2006;12:3–11. (In Russian)

32. European Food Safety Authority. Management of left-censored data in dietary exposure assessment of chemical substances. Scientific report of EFSA. EFSA Journal 2010 Jun;8(3):1557–1653.
33. GEMS/Food-EURO Second Workshop on Reliable Evaluation of Low-Level Contamination of Food. Report on a Workshop in the Frame of GEMS/Food-EURO (with Addendum, January 2013); 1995 May 26-27; Kulmbach, Federal Republic of Germany. 10 p.
34. Cinelli G., Tondeur F. Log-normality of indoor radon data in the Walloon region of Belgium. J Environ Radioact. 2015 May;143:100–9.
35. Kononenko D.V., Kormanovskaya T.A. Risk assessment for the population of regions of the Russian Federation from exposure to radon based on data from radiation-hygienic passports of territories. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2015;8(4):15–22. (In Russian)
36. Kononenko D.V. A differentiated approach to the risk assessment from exposure to radon. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2017;10(1):76–83. (In Russian)
37. Dubner P.N. English-Russian glossary on statistics: basic concepts. Available from: <http://masters.donntu.org/2002/fvti/spivak/library/book2/book2.htm> (Accessed: 23.01.2019) (In Russian)

Received: January 24, 2019

**For correspondence: Dmitry V. Kononenko** – researcher, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russian Federation. E-mail: [d.kononenko@niirg.ru](mailto:d.kononenko@niirg.ru))

**For citation: Kononenko D.V. Analysis of distributions of indoor radon concentrations in the regions of the Russian Federation. Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene, 2019, Vol. 12, No 1, pp.85-103. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-85-103**

## Исследование программ автоматической модуляции силы тока для оптимизации протоколов сканирования в компьютерной томографии

Л.А. Чипига

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

*Компьютерная томография является наиболее высокодозовым методом лучевой диагностики. Для поддержания доз облучения пациентов от КТ-исследований на приемлемом уровне необходимо применять принцип оптимизации. Неотъемлемой частью оптимизации является нахождение компромисса между снижением доз пациента и получением изображения приемлемого качества, обладающего достоверной диагностической информацией. Доза облучения пациента и качество диагностического изображения определяются параметрами протоколов КТ-сканирования. Целью данной работы являлось определение зависимостей доз облучения пациента и качества КТ-изображения от параметров программ автоматической модуляции силы тока (Auto mA, CareDose и DoseRight) на примере исследования грудной клетки. Работа проводилась на трёх современных компьютерных томографах, наиболее распространенных в России производителей: Ingenuity Core 128, Philips; Optima 64, General Electric; Definition AS, Siemens. В качестве объекта исследования в работе был использован антропоморфный фантом грудной клетки Lungman (Kyoto Kagaki CO., LTD). Для изучения программ автоматической модуляции силы тока для всего диапазона напряжений (80–120 кВ) в протоколах сканирования изменяли параметры ref. mAs, NI и DRI для программ в CareDose (Siemens), Auto mA (GE) и RightDose (Philips) соответственно. Оценку эффективной дозы проводили по официальной методике, приведенной в МУ 2.6.1.2944-11. Для оценки качества изображения был выбран параметр – шум КТ-изображения (HU), который определялся в области сердца как наиболее однородной при исследовании грудной клетки. Было получено, что для томографов фирмы GE с программой Auto mA шум изображения прямо пропорционален параметру NI; доза пациента имеет степенной характер зависимости от NI и снижается при увеличении NI. Для томографов Siemens с программой CareDose зависимость шума изображения от ref. mAs описывается степенной функцией со степенью, изменяющейся от -0,58 до -0,31 при разных напряжениях, и снижается с увеличением напряжения; доза пациента прямо пропорциональна ref. mAs и увеличивается с напряжением. Для томографов Philips с программой DoseRight зависимость шума изображения от DRI описывается степенной функцией со степенью, изменяющейся от -0,72 до -0,42 при разных напряжениях, и снижается с увеличением напряжения; доза пациента прямо пропорциональна DRI и не зависит от напряжения. Программы автоматической модуляции силы тока специфичны для каждого производителя диагностического оборудования, что необходимо учитывать при создании протоколов сканирования. Полученные зависимости можно использовать при оптимизации протоколов сканирования.*

**Ключевые слова:** компьютерная томография, эффективная доза, качество изображения, шум изображения, автоматическая модуляция силы тока, антропоморфный фантом.

### Введение

Рентгеновская компьютерная томография (КТ) является диагностическим методом визуализации послойных изображений внутренних органов человека, основанным на компьютерной реконструкции изображений, получаемых при круговом сканировании пациента веерным пучком рентгеновского излучения [1, 2, 3]. Частота КТ-исследований в структуре лучевой диагностики в России за последние 8 лет возрос-

ла в три раза и в 2017 г. превысила 10 млн исследований в год [4].

Данный метод диагностики связан со значительными дозами облучения пациентов: 1–4 мЗв при исследованиях головы, 8–15 мЗв при исследованиях брюшной полости или таза; еще большие дозы (до 60 мЗв) получают пациенты при многофазных исследованиях, которые проводятся с введением пациенту контрастного вещества [5, 6]. Вклад в коллективную дозу медицинского облучения

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

населения России от КТ-исследований в 2017 г. достиг 50%. В странах с развитой медициной вклад КТ в коллективную дозу от всех медицинских источников составляет 50% в США [7], 60% в Европе, в отдельных странах достигает 80% [8].

Использование данного метода диагностики оправдано его высокой информативностью. Непременным условием его широкого применения в медицинской практике является оптимизация параметров проведения исследований – нахождение компромисса между минимальным уровнем облучения пациента и качеством изображения, обладающего достаточной диагностической информативностью для решения поставленной клинической задачи [9–13].

Разработка оптимального протокола проведения КТ-исследования зависит от типа томографа, клинической задачи и практики работы в отделении. Доза излучения, получаемая пациентом, и качество изображения определяются следующими параметрами протоколов КТ-исследования: длиной сканирования (мм), количеством фаз исследования, напряжением на трубке (кВ), произведением силы тока на время вращения трубки (экспозицией, мАс), коллимацией пучка излучения (мм), питч-фактором (отн. ед.), толщиной среза реконструкции (мм) [1, 9, 14]. Качество изображения также зависит от выбранного метода реконструкции.

Для подбора оптимальных параметров проведения исследования, учитывающих телосложение пациента, современные компьютерные томографы оборудованы программами автоматической модуляции силы тока [15–21]. Сила тока во время исследования выбирается, исходя из толщины и плотности сканируемых структур организма, что позволяет существенно снизить дозу при сохранении необходимого качества изображения. Программы автоматической модуляции силы тока специфичны для каждого производителя томографов.

В связи с этим в настоящее время отсутствует универсальный подход к нахождению оптимальных протоколов КТ-исследований.

Для оценки качества изображения существуют как субъективные методы (экспертная оценка качества изображения [22–24]), так и объективные, которые подразумевают оценку количественных параметров качества изображений. Для объективной оценки качества изображения используются разные физико-технические параметры: шум изображения [10, 11, 16, 19, 25], отношение контраста к шуму изображения (contrast-to-noise ratio – CNR) [9, 13], отношение сигнала к шуму изображения (signal-to-noise ratio – SNR) [23]. Основные зависимости дозы пациента от параметров КТ-изображения описаны в литературе [1, 9, 11, 25], однако они не учитывают индивидуальные особенности программ автоматической модуляции силы тока, имеют общий характер и не всегда применимы в конкретных случаях на практике при оптимизации протоколов КТ-исследования.

**Цель исследования** – определение зависимости эффективной дозы как меры облучения пациента и шума КТ-изображения как меры качества изображения от параметров программ автоматической модуляции силы тока (Auto mA, CareDose и DoseRight) для оптимизации протоколов сканирования.

### Материалы и методы

#### Компьютерные томографы и программы автоматической модуляции

Работу проводили на трёх современных компьютерных томографах, наиболее распространенных в России производителей: Optima 64, General Electric (США); Definition AS, Siemens (Германия); Ingenuity Core 128, Philips (Нидерланды). Томографы были оснащены следующими программами автоматической модуляции силы

Обследованные томографы, программы автоматической модуляции силы тока, их параметры и описание

Таблица 1

[Table 1

#### Investigated CT units, tube current modulation programs, their parameters and description]

Томограф, производитель (год выпуска) [Tomograph, manufacturer (year of production)]	Программа автоматической модуляции силы тока [Tube current modulation]	Параметр [Parameter]	Принцип действия [Operating principle]
Optima 64, GE (2015)	Auto mA	Noise Index (NI), отн. ед., min-max mA	В протоколе задаётся значение NI – шум изображения В протоколе определяются граничные значения силы тока (mA) [Protocol-based NI – noise of image and values of tube current (mA) range]
Definition AS, Siemens (2015)	CareDose 4D	Ref. mAs, мАс	В протоколе задаётся референтное значение экспозиции (ref. mAs) и соответствующее ему качество изображения для референтного пациента [The reference mAs (ref.mAs) and corresponding image quality for reference patient are determined in protocol]
Ingenuity Core, Philips (2015)	DoseRight	Dose Right Index (DRI), отн. ед.	В протоколе задаётся значение DRI, соответствующее референтному значению экспозиции, для достижения однородного качества изображения [The value of DRI corresponding to the reference mAs value for the homogenous image quality]

тока: Auto mA у Optima 64 (GE) [26], CareDose у Definition AS (Siemens) [20], DoseRight у Ingenuity Core 128 (Philips) [27]. Общая информация по КТ представлена в таблице 1.

У производителя GE для модуляции силы тока применяется программа Auto mA. Качество изображения задается параметром NI, который определяется как стандартное отклонение средней плотности изображения в центральной области однородного водного фантома. На основании ослабления излучения для зоны сканирования конкретного пациента, рассчитанного по «пристрелочному» снимку, программа моделирует силу тока для достижения выбранного уровня шума для каждого изображения. В протоколе определяются границы, в пределах которых система осуществляет изменение силы тока.

Томографы фирмы Siemens оснащены программой CareDose 4D для модуляции силы тока. При сканировании программа основывается на толщине тела пациента и изменении ослабления излучения в обследуемой зоне, контролируя и изменяя силу тока во время каждого оборота рентгеновской трубки. Качество изображения задается в протоколе с помощью референтного значения экспозиции (ref. mAs), определяющего уровень шума изображения для референтного пациента (взрослый пациент весом 70–80 кг). Программа CareDose обладает тремя уровнями модуляции: strong, average и weak. При использовании уровня strong программа будет более резко увеличивать или уменьшать дозу для пациентов, обладающих типом телосложения, отличным от референтного. Для уровня weak изменение дозы будет более пологим.

У томографов Philips для модуляции силы тока применяется программа DoseRight. Для задания качества изображения в программе используется понятие референтного качества. В протоколе определяется параметр DRI, соответствующий значению экспозиции, основанному на ослаблении излучения обследуемой зоны пациента на пристрелочном снимке. Сила тока автоматически подбирается для достижения уровня шума изображения, соответствующего заданному значению экспозиции для референтного водозэквивалентного фантома диаметром 33 см. Увеличение/снижение этого параметра на  $-1(+1)$  соответствует возрастанию/убыванию средней силы тока на 12%.

#### ФАНТОМ

Для имитации тела пациента был использован антропоморфный фантом (рис. 1), грудной клетки здорового мужчины (рост 174, вес 75 кг) «Lungman» Multipurpose Chest Phantom N1 (KyotoKagaku Co., LTD, Япония) [28]. Фантом выполнен из тканезквивалентных материалов (полиуретан, эпоксидная смола, карбонат кальция).



**Рис. 1.** Размещение антропоморфного фантома на столе томографа в ходе эксперимента. Внутренняя часть фантома (средостение и легочные сосуды) извлечена [28]

[Fig. 1. Positioning of the anthropomorphic phantom on the tomograph table during the experiment. The internal part of the phantom (mediastinum and pulmonary vessels) is removed]

#### Протоколы КТ-сканирования

Для изучения работы программ автоматической модуляции силы тока трёх разных производителей КТ фантом сканировали с применением разных протоколов с включёнными программами автоматической модуляции силы тока. Для каждого протокола изменялись значения параметров автоматической модуляции силы тока при разных значениях напряжения в диапазоне 80–120 кВ. Параметры протоколов сканирования приведены в таблице 2.

Таблица 2

**Протоколы КТ-сканирования для изучения зависимостей дозы пациента и качества изображения от параметров программ автоматической модуляции силы тока на трёх томографах разных моделей при разных значениях напряжения на трубке**

[Table 2

**CT protocols used for the evaluation of dependence of patient dose and image quality on tube current modulation parameters of three different tomograph models for the different values of tube voltage]**

Номер протокола [Protocol number]	Напряжение, кВ [Tube voltage, kV]	Ingenuity Core, Philips				Optima 64, GE		Definition AS, Siemens		
		DRI, отн. ед.	Питч, отн. ед. [Pitch]	Коллимация, мм [Collimation, mm]	NI, отн. ед. ( $\text{mA}_{\text{min}} - \text{mA}_{\text{max}}$ )	Питч, отн. ед. [Pitch]	Коллимация, мм [Collimation, mm]	ref. mAs	Питч, отн. ед. [Pitch]	Коллимация, мм [Collimation, mm]
1	80	3	1,448	32×1,25	15,23 (10–400)	0,984	32×1,25	100	1	32×1,2
2	80	6	1,448	32×1,25	18,48 (10–400)	0,984	32×1,25	150	1	32×1,2

Номер протокола [Protocol number]	Напряжение, кВ [Tube voltage, kV]	Ingenuity Core, Philips				Optima 64, GE			Definition AS, Siemens		
		DRI, отн. ед.	Питч, отн. ед. [Pitch]	Коллимация, мм [Collimation, mm]	NI, отн. ед. ( $A_{\min}$ - $A_{\max}$ )	Питч, отн. ед. [Pitch]	Коллимация, мм [Collimation, mm]	ref. mAs	Питч, отн. ед. [Pitch]	Коллимация, мм [Collimation, mm]	
3	80	9	1,448	32×1,25	21,73 (10–400)	0,984	32×1,25	200	1	32×1,2	
4	80	12	1,448	32×1,25	24,98 (10–400)	0,984	32×1,25	250	1	32×1,2	
5	80	15	1,385	32×1,25	28,23 (10–400)	0,984	32×1,25	300	1	32×1,2	
6	80	18	1,058	32×1,25	–	–	32×1,25	350	1	32×1,2	
7	100	3	1,448	32×1,25	15,23 (10–480)	0,984	32×1,25	100	1	32×1,2	
8	100	6	1,448	32×1,25	18,48 (10–480)	0,984	32×1,25	150	1	32×1,2	
9	100	9	1,448	32×1,25	21,73 (10–480)	0,984	32×1,25	200	1	32×1,2	
10	100	12	1,227	32×1,25	24,98 (10–480)	0,984	32×1,25	250	1	32×1,2	
11	100	15	1,146	32×1,25	28,23 (10–480)	0,984	32×1,25	300	1	32×1,2	
12	100	18	1,389	32×1,25	–	–	32×1,25	350	1	32×1,2	
13	120	3	1,448	32×1,25	15,23 (10–560)	0,984	32×1,25	100	1	32×1,2	
14	120	6	1,448	32×1,25	18,48 (10–560)	0,984	32×1,25	150	1	32×1,2	
15	120	9	1,448	32×1,25	21,73 (10–560)	0,984	32×1,25	200	1	32×1,2	
16	120	12	1,448	32×1,25	24,98 (10–560)	0,984	32×1,25	250	1	32×1,2	
17	120	15	1,248	32×1,25	28,23 (10–560)	0,984	32×1,25	300	1	32×1,2	
18	120	18	1,07	32×1,25	–	–	32×1,25	350	1	32×1,2	

Для всех протоколов использовались следующие стандартные настройки: время ротации трубки 1 с; зона сканирования – 300 мм от верхушек легких; пристрелочные снимки во всех случаях выполнялись на том же напряжении, что и основное сканирование. Реконструкция всех изображений выполнялась с толщиной среза 2 мм следующими методами: Standart на томографах Ingenuity Core (Philips) и Optima 64 (GE), B31f на аппарате Definition AS (Siemens).

*Оценка эффективной дозы*

В качестве дозовой величины использовали эффективную дозу, рассчитываемую по формуле 1 (согласно МУ 2.6.1.2944-11<sup>1</sup>):

$$E_{эфф} = DLP \cdot k, \text{ мЗв}, (1)$$

где: *DLP* – произведение дозы на длину сканирования из дозового отчета для каждого протокола сканирования, МГр·см; *k* – дозовый коэффициент для КТ-сканирования грудной клетки – 0,017 мЗв/(МГр·см).

*Оценка качества КТ-изображения*

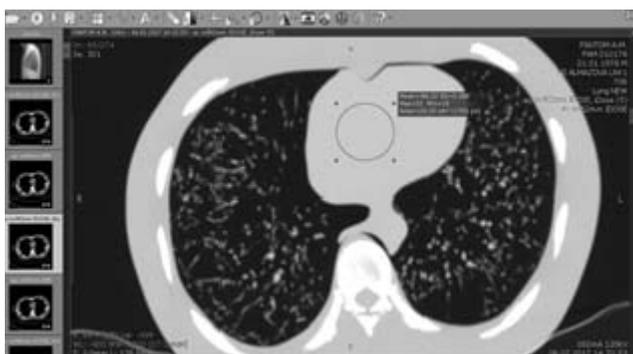
Для оценки качества изображения был выбран параметр, наиболее доступный в клинических условиях персоналу отделения, – шум КТ-изображения (HU) [10, 11, 25]. Шум определялся для зоны сканирования сердца как наиболее однородной области при исследовании грудной клетки.

Обработка КТ-изображений проводилась с помощью специализированного программного обеспечения

<sup>1</sup> Контроль эффективных доз облучения пациентов при медицинских рентгенологических исследованиях. Методические указания МУ 2.6.1.2944-11. М.: Роспотребнадзор, 2011. 32 с.

[Methodical guidance 2.6.1.2944-11. Assessment of effective dose to the patients undergoing X-ray examinations. Moscow, Rospotrebnadzor, 2011, 32 p.]

RadiAnt DICOM Viewer 4.6.5. [29]. На аксиальных срезах КТ-изображения обрисовывалась область интереса в зоне сердца, как показано на рисунке 2. Для оценки шума изображения в области интереса определяли значение стандартного отклонения значений плотности по шкале Хаунсфилда, HU. На каждой серии КТ-изображений, соответствующих одному протоколу сканирования, было обрисовано пять областей интереса для пяти измерений уровня HU, которые потом усреднялись. Для корректного сравнения области интереса копировались на те же позиции для каждой серии.



**Рис. 2.** Аксиальный срез КТ-изображения фантома и область интереса, для которой определяется уровень шума изображения (выделена кругом)

[Fig. 2. Axial slice of the CT image of the phantom and region of interest (marked with green) that was used for the estimation of the noise level of the CT image]

## Результаты

Были получены зависимости эффективной дозы пациента и шума изображения от параметров автоматической модуляции силы тока, специфичные для каждой обследованной программы.

### Auto mA

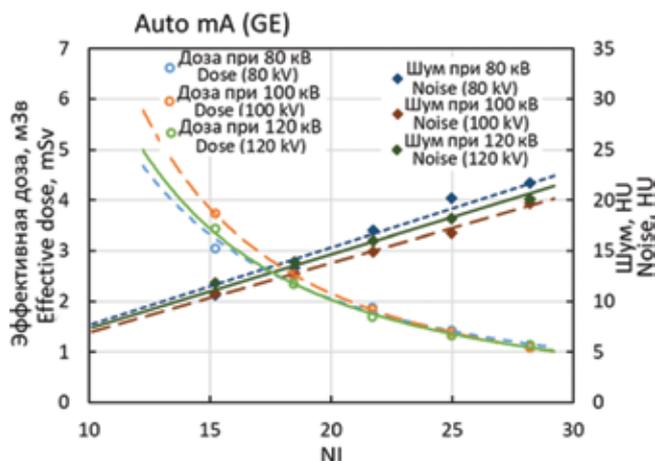
На аппарате Optima 64, GE установлена программа Auto mA, которая поддерживает заданный уровень шума изображения на протяжении всей зоны сканирования, поэтому зависимость шума изображения от параметра NI можно описать линейной функцией. Также было определено, что шум изображения в этом случае почти не меняется для разных напряжений (рис. 3):

$$\text{Шум} = a \cdot NI, \text{ HU}, (2)$$

где:  $a$  – коэффициент, значение которого определяли методом наименьших квадратов,  $\text{HU}^{-1}$  (табл. 3);  $NI$  – параметр программы автоматической модуляции силы тока Auto mA, отн.ед. Зависимость эффективной дозы можно описать степенной функцией (см. рис. 3):

$$E_{\text{эфф}} = b_1 \cdot NI^{-b_2}, \text{ мЗв}, (3)$$

где:  $E_{\text{эфф}}$  – эффективная доза, мЗв, определенная по формуле 1;  $b_1$ , мЗв, и  $b_2$ , отн. ед. – коэффициенты, значения которых определяли методом наименьших квадратов (см. табл. 3).



**Рис. 3.** Графики зависимостей эффективной дозы, мЗв, и шума КТ-изображения, HU, от NI при разных напряжениях для программы Auto mA (Optima 64, GE). Линиями отмечены аппроксимирующие зависимости

[Fig. 3. Relations between the effective dose, mSv, and noise of the CT image, HU, and NI for the different tube voltage values for the Auto mA program (Optima 64, GE). Lines correspond to the approximation curves]

Таблица 3

Значения коэффициентов  $a$  в формуле 2 и  $b_1, b_2$  в формуле 3, полученные для разных напряжений с соответствующими коэффициентами детерминации  $R^2$

[Table 3]

The values of coefficients  $a$  in equation 2 and  $b_1, b_2$  in equation 3 estimated for the different tube voltage and corresponding coefficient of determination  $R^2$

Напряжение, кВ [Tube voltage, kV]	Формула 2 [Equation 2]		Формула 3 [Equation 3]		
	$a, \text{HU}^{-1}$ [a, $\text{HU}^{-1}$ ]	$R^2$ [ $R^2$ ]	$b_1, \text{мЗв}$ [ $b_1, \text{mSv}$ ]	$b_2, \text{отн.ед.}$ [ $b_2, \text{rel.unit}$ ]	$R^2$ [ $R^2$ ]
80	0,77	0,96	311	1,7	0,99
100	0,73	0,98	485	1,8	0,99
120	0,69	0,99	874	2,0	0,98

CareDose

На аппарате Definition AS, Siemens установлена программа CareDose. Было получено, что зависимость эффективной дозы пациента от параметра программы автоматической модуляции силы тока  $ref. \text{mAs}$  можно описать линейной функцией (рис. 4):

$$E_{эфф} = c \cdot ref. \text{mAs}, \text{ мЗв}, (4)$$

где:  $E_{эфф}$  – эффективная доза, мАс, определенная по формуле 1;  $c$  – коэффициент, значение которого определяли методом наименьших квадратов, мЗв/(мАс) (табл. 4);  $ref. \text{mAs}$  – параметр программы автоматической модуляции силы тока CareDose, мАс.

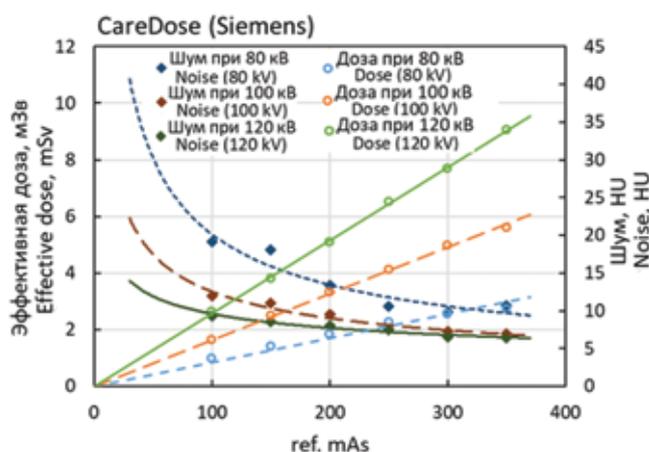


Рис. 4. Графики зависимостей эффективной дозы, мЗв, и шума КТ-изображения, HU, от  $ref. \text{mAs}$  при разных напряжениях для программы CareDose (Definition AS, Siemens). Линиями отмечены аппроксимирующие зависимости [Fig. 4. Relations between the effective dose, mSv, and noise of the CT image, HU, and  $ref. \text{mAs}$  for the different tube voltage values for the CareDose program (Definition AS, Siemens). Lines correspond to the approximation curves]

Таблица 4

Значения коэффициентов  $c$  в формуле 4 и  $d_1, d_2$  в формуле 5, полученные для разных напряжений с соответствующими коэффициентами детерминации  $R^2$

[Table 4]

The values of coefficients  $c$  in equation 4 and  $d_1, d_2$  in equation 5 estimated for the different tube voltage and corresponding coefficient of determination  $R^2$

Напряжение, кВ [Tube voltage, kV]	Формула 4 [Equation 4]		Формула 5 [Equation 5]		
	$c, \text{мЗв}/(\text{мАс})$ [c, $\text{mSv}/(\text{mAs})$ ]	$R^2$ [ $R^2$ ]	$d_1, \text{HU}/(\text{мАс})$ [ $d_1, \text{HU}/(\text{mAs})$ ]	$d_2, \text{отн.ед.}$ [ $d_2, \text{rel.unit}$ ]	$R^2$ [ $R^2$ ]
80	0,009	0,94	41	0,31	0,94
100	0,016	0,99	113	0,48	0,95
120	0,026	0,90	297	0,58	0,90

Зависимость шума КТ-изображения от *ref.mAs* можно описать степенной функцией (см. рис. 4):

$$\text{Шум} = d_1 \cdot (\text{ref.mAs})^{-d_2}, \text{HU}, (5)$$

где:  $d_1$ , HU/мАс, и  $d_2$ , отн.ед. – коэффициенты, значения которых определяли методом наименьших квадратов (см. табл. 4); *ref.mAs* – параметр программы автоматической модуляции силы тока CareDose, мАс.

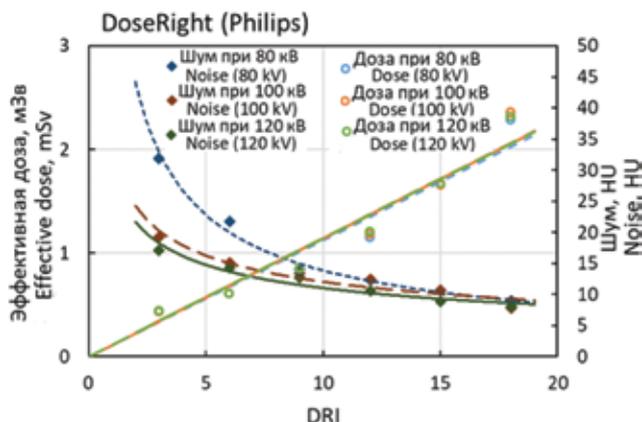
Эффективная доза и шум КТ-изображения не изменялись от уровня модуляции силы тока (strong, average и weak).

### DoseRight

На аппарате Ingenuity Core, Philips установлена программа DoseRight, которая нацелена на поддержание определенного качества изображения, соответствующего выбранному параметру DRI. В результате изучения этой программы было получено, что зависимость эффективной дозы от параметра DRI можно описать линейной функцией (рис. 5):

$$E_{\text{эфф}} = f \cdot \text{DRI}, \text{мЗв}, (6)$$

где:  $E_{\text{эфф}}$  – эффективная доза, мЗв, определенная по формуле 1;  $f$  – коэффициент, значение которого определяли методом наименьших квадратов, мЗв; *DRI* – параметр программы автоматической модуляции силы тока DoseRight, отн.ед. (табл. 5). Зависимость шума КТ-изображения от DRI можно описать степенной функцией (см. рис. 5):



**Рис. 5.** Графики зависимостей эффективной дозы, мЗв, и шума КТ-изображения, HU, от DRI при разных напряжениях для программы DoseRight (Ingenuity Core, Philips). Линиями отмечены аппроксимирующие зависимости

**[Fig. 5.]** Relations between the effective dose, mSv, and noise of the CT image, HU, and DRI for the different tube voltage values for the DoseRight program (Ingenuity Core, Philips). Lines correspond to the approximation curves]

$$\text{Шум} = g_1 \cdot \text{DRI}^{-g_2}, \text{HU}, (7)$$

где:  $g_1$ , HU и  $g_2$ , отн.ед. – коэффициенты, значения которых определялись методом наименьших квадратов (см. табл. 5).

### Обсуждение

Программы автоматической модуляции силы тока разных производителей основаны на различных принципах работы [20, 26, 27]. Каждая программа имеет свое решение для задания и поддержания качества изображения, поэтому сложно проводить прямое сравнение между программами. Помимо разных алгоритмов расчета, в программах различаются референтные объекты, относительно которых происходит оценка силы тока для достижения необходимого качества изображения: в программе Auto mA качество изображения приводится к однородному водному фантому, в программе CareDose – к референтному взрослому пациенту весом 70–80 кг, а в программе DoseRight – к референтному водозэквивалентному фантому диаметром 33 см. Приведенные в работе зависимости согласуются с результатами других работ, посвященных изучению программ автоматической модуляции силы тока [15, 16, 17, 18, 19, 20, 30].

### Auto mA

На томографе Optima при использовании программы Auto mA снижение параметра NI влечет за собой ужесточение требований к качеству КТ-изображения – снижению шума. Для достижения этого программа Auto mA увеличивает силу тока, что приводит к возрастанию эффективной дозы (см. рис. 3). Зависимость имеет нелинейный характер: при изменении NI в диапазоне < 20 HU доза увеличивается быстрее, чем при большем уровне шума. Снижение NI с 21 до 15 приведет к увеличению дозы на 1,6 мЗв, а снижение NI с 28 до 21 – на 0,7 мЗв.

Изменение напряжения не оказывает значительного влияния на эффективную дозу. Снижение напряжения приводит к снижению средней энергии рентгеновского пучка, увеличение поглощения излучения в обследуемом объекте и дефициту событий на приемнике изображения. Это компенсируется программой Auto mA увеличением силы тока для поддержания необходимого количества полезных фотонов на приемнике, сигнал от которых используется при формировании изображения. При этом различия в эффективной дозе при разных напряжениях не превышали 20% на всем обследованном диапазоне NI.

Таблица 5

**Значения коэффициентов  $f$  в формуле 6 и  $g_1, g_2$  в формуле 7, полученные для разных напряжений с соответствующими коэффициентами детерминации  $R^2$**

[Table 5

**The values of coefficients  $f$  in equation 6 and  $g_1, g_2$  in equation 7 estimated for the different tube voltage and corresponding coefficient of determination  $R^2$ ]**

Напряжение, кВ [Tube voltage, kV]	Формула 6 [Equation 6]		Формула 7 [Equation 7]		
	$f$ , мЗв [ $f$ , mSv]	$R^2$ [ $R^2$ ]	$g_1$ , HU [ $g_1$ , HU]	$g_2$ , отн.ед. [ $g_2$ , rel.unit]	$R^2$ [ $R^2$ ]
80	0,11	0,94	73	0,72	0,99
100	0,11	0,94	33	0,44	0,88
120	0,11	0,94	29	0,42	0,94

Параметр NI определяет шум получаемого изображения для референтных условий, поэтому уменьшение NI приводит к линейному снижению уровня шума изображения (см. рис. 3). Коэффициент  $a$  в формуле 2 – фактор отклонения от референтных условий в программе Auto mA. В таблице 3 приведены значения коэффициентов  $a$  для разных напряжений в условиях обследования грудной клетки антропоморфного фантома. В этих условиях на всех напряжениях коэффициент  $a < 1$ , что говорит о переоценке ослабления излучения обследованной зоны программой при модуляции силы тока. Значение  $a$  приближается к 1 при уменьшении напряжения.

Из приведенных зависимостей следует, что для сканирования грудной клетки целесообразно использовать напряжение 80 кВ, при котором коэффициент  $a$  ближе к 1.

#### CareDose

На томографе Definition AS используется программа CareDose 4D. Было получено, что эффективная доза линейно возрастает с увеличением параметра ref.mAs, при этом коэффициент пропорциональности линейной зависимости уменьшается с уменьшением напряжения (см. рис. 4). Коэффициенты пропорциональности, приведенные в таблице 4, указывают на значительное влияние напряжения на эффективную дозу. Скорость роста дозы с увеличением ref.mAs выше при 120 кВ, увеличение ref. As на 100 приводит к возрастанию дозы на 2,5 мЗв, в то время как при 80 кВ изменение ref.mAs на 100 изменяет дозу на 1,5 мЗв, а при 80 кВ – на 0,7 мЗв.

В программе CareDose качество изображения задается в единицах ref.mAs, т.е. значением mAs для референтного фантома. Для стандартных условий шум КТ-изображения обратно пропорционален квадратному корню от произведения силы тока на время ротации трубки (mAs):  $\text{Шум} \sim \frac{1}{\sqrt{\text{mAs}}}$  [9, 30]. Полученная в данном исследовании зависимость шума изображения от ref.mAs (формула 5) свидетельствует о влиянии на этот параметр условий сканирования. Коэффициенты  $d_1$  и  $d_2$  (см. табл. 4) учитывают нестандартные для программы CareDose условия: сканирование антропоморфного фантома грудной клетки на разных напряжениях при реконструкции V31f. Коэффициент  $d_2 = 0,5$  достигается при 100 кВ, что означает, что при этом напряжении программа CareDose обеспечивает необходимый уровень шума КТ-изображения на всем диапазоне ref.mAs.

Программа CareDose нацелена на подбор силы тока для индивидуальных пациентов с целью достижения качества изображения, сопоставимого с качеством изображения для референтного пациента. В нашем исследовании изменение уровня модуляции силы тока (strong, average и weak) не оказывало значительного влияния на шум КТ-изображения и эффективную дозу, т.к. в настоящей работе исследование проводилось с фантомом стандартного пациента, схожего по антропометрическим параметрам с референтным пациентом в программе CareDose.

#### DoseRight

На томографе фирмы Ingenuity Core при использовании программы DoseRight увеличение параметра DRI приводит к возрастанию эффективной дозы. Зависимость имеет линейный характер, увеличение DRI на 3 единицы приводит к возрастанию дозы на 40% (см. рис. 5). При этом зави-

симость от напряжения компенсируется автоматическим подбором силы тока, так что доза меняется мало.

Для задания качества КТ-изображения в программе DoseRight используется значение DRI, соответствующее референтному значению mAs (в водозквивалентном фантоме диаметром 33 см). Зависимость шума изображения от DRI имеет степенной характер (формула 7). Как сказано ранее, шум КТ-изображения обратно пропорционален экспозиции при неизменных остальных параметрах. Таким образом, коэффициент  $g_2$  в формуле 7 должен приближаться к 0,5 для изображения референтного объекта – водозквивалентного фантома диаметром 33 см, полученного при стандартной реконструкции при определенном напряжении. Отклонение значений  $g_2$  от 0,5 и изменение коэффициента  $g_1$  обусловлено учетом в программе DoseRight отклонения условий сканирования от референтных. Для антропоморфного фантома грудной клетки, использованного в данной работе, напряжение 100 кВ обеспечивает значение  $g_2$  около 0,5 и поглощение излучения антропоморфным фантомом приближено к стандартным условиям. При напряжении 80 кВ при снижении DRI наблюдается более резкое увеличение шума ( $g_2 = 0,7$ ), а при 120 кВ – более пологое ( $g_2 = 0,4$ ).

#### Оптимизация протоколов КТ-сканирования

При реализации принципа оптимизации радиационной защиты пациентов и соответствующем пересмотре протоколов сканирования необходимо найти параметры, которые обеспечивают качество КТ-изображения, достаточное для решения поставленной клинической задачи при минимальной дозе облучения пациента. Для этого необходимо понимать влияние параметров протоколов КТ-сканирования на дозу пациента и качество изображения.

Полученные в данной работе зависимости эффективной дозы и шума КТ-изображения от параметров трёх разных программ автоматической модуляции силы тока можно использовать при оптимизации протоколов сканирования с использованием этих программ. Ориентируясь на полученные в данной работе зависимости, можно оценить, с одной стороны, как изменится доза пациента при изменении параметров протокола сканирования, а с другой стороны, как это повлияет на качество (шум) изображения.

Используя систему уравнений, описывающих зависимости шума изображения и дозовую нагрузку, зависящие от условий сканирования (см. графики, приведенные на рисунках 3, 4 и 5), можно определить стратегию оптимизации протоколов сканирования, ориентируясь на предполагаемую дозу пациента и уровень шума изображения, допустимый для конкретной клинической задачи исследования.

#### Заключение

Программы автоматической модуляции силы тока специфичны для каждого производителя диагностического оборудования. Для каждой из трёх исследованных в работе программ были получены зависимости эффективной дозы и шума изображения от параметров автоматической модуляции силы тока.

Было установлено, что для программы Auto mA шум изображения прямо пропорционален параметру NI, а эффективная доза пациента снижается при увеличении NI, при этом ее резкое изменение наблюдается при  $NI < 20$ , после

чего зависимость становится более пологой. Для программ CareDose и DoseRight эффективная доза прямо пропорциональна параметрам ref.mAs и DRI соответственно. При этом для программы DoseRight было выявлено, что напряжение мало влияет на эффективную дозу, в то время как в программе CareDose ее значение ощутимо возрастает с увеличением напряжения. Шум изображения изменяется обратно пропорционально параметрам ref.mAs и DRI в степени, которая варьирует от 0,3 до 0,6 в программе CareDose и от 0,4 до 0,7 DoseRight для диапазона напряжений 80–120 кВ.

Полученные зависимости возможно использовать при оптимизации протоколов сканирования, ориентируясь на качество изображения и уровень облучения пациента.

#### Благодарности

Автор выражает свою благодарность Катаевой Галине Вадимовне (Институт мозга человека им. Н.П. Бехтеревой) за помощь в подготовке экспериментальной работы и анализе полученных данных, Водоватову Александру Валерьевичу и Голикову Владиславу Юрьевичу (ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева) за помощь в анализе данных и обсуждении результатов работы.

#### Литература

1. Пропоп, М. Спиральная и многослойная компьютерная томография / М. Пропоп, М. Галански; под ред. А.В. Зубарева, Ш.Ш. Шотемора. – М.: МЕДпресс-информ, 2006. – 412 с.
2. Костылев, В.А. Медицинская физика / В.А. Костылев, Б.Я. Наркевич. – М.: Медицина, 2008. – 464 с.
3. Медицинская радиология (основы лучевой диагностики и лучевой терапии): Учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Медицина, 2000. – 672 с.
4. Барковский, А.Н. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2017 году: информ. сборник / А.Н. Барковский [и др.]. – СПб, 2018.
5. Balonov M., Golikov V., Zvonova I., [et. al.] Patient doses from medical examinations in Russia: 2009–2015. J. Radiol. Prot., 2018, Vol. 38, pp. 121–139.
6. Chipiga L., Bernhardsson C. Patient doses in computed tomography examinations in two regions of the Russian Federation. Rad. Prot. Dosim., 2016, Vol. 169, № 1-4, pp. 240–244.
7. NCRP Report No. 160, Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States, 2009, National Council on Radiation Protection and Measurements: Bethesda, MD. PMID: 19509507.
8. Radiation Protection 180 pt. 1. Medical radiation exposure of the European population. European Commission, 2014, 181 p.
9. Quality assurance programme for computed tomography: diagnostic and therapy applications. Vienna. International Atomic Energy Agency, 2012, 192 p.
10. Hyun W.G. CT Radiation Dose Optimization and Estimation: an Update for Radiologists. Korean J. Radiol., 2012, Vol. 13, №1, pp. 1–11.
11. Kalender W.A., Buchenau S., Deak P. [et.al.] Technical approaches to the optimisation of CT. Phys. Med., 2008, Vol. 24, № 2, pp. 71–79.
12. Yu L., Liu X., Leng S. [et. al.] Radiation dose reduction in computed tomography: techniques and future perspective. Imaging Med., 2009, Vol. 1, № 1, pp. 65–84.
13. Martin C. J. The importance of radiation quality for optimisation in radiology. Biomed. Imaging. Interv. J., 2007, Vol. 3, № 2, pp. e38.
14. AAPM report №96. The Measurement, Reporting, and Management of Radiation Dose in CT / AAPM task group 23, American Association of Physicists in Medicine, One Physics Ellipse, 2008, 34 p.
15. Martin C.J., Sookpeng S. Setting up computed tomography automatic tube current modulation systems. J. Radiol. Prot., 2016, Vol. 36, № 3, pp. R74–R95.
16. Papadakis A. E. Automatic exposure control in CT: the effect of patient size, anatomical region and prescribed modulation strength on tube current and image quality. Eur. Radiol., 2014, Vol. 24, № 10, pp. 2520–2531.
17. Rizzo S. Comparison of angular and combined automatic tube current modulation techniques with constant tube current CT of the abdomen and pelvis. Am. J. Roentgenol., 2006, Vol. 186, pp. 673–679.
18. Singh S. Automatic exposure control in CT: applications and limitations. J. Am. Coll. Radiol., 2011, Vol. 8, pp. 446–449.
19. Söderberg M., Gunnarsson M. Automatic exposure control in computed tomography – an evaluation of systems from different manufacturers. Acta. Radiol., 2010, Vol. 51, № 6, pp. 625–634.
20. Söderberg M. Overview, practical tips, and potential pitfalls of using automatic exposure control in CT – Siemens CARE Dose 4D. Radiat. Prot. Dosimetry., 2016, Vol. 169, № 1–4, pp. 84–91.
21. Stratis A., Kottou S., Molfetas M. The effect of a combined tube current modulation system on dose delivered to patients undergoing thoracic and abdominal CT with a 128-slice scanner. Radiat. Prot. Dosimetry, 2013, Vol. 153, № 2, pp. 206–211.
22. Metz C.E. ROC analysis in medical imaging: a tutorial review of the literature. Radiol. Phys. Technol., 2008, Vol. 1, № 1, pp. 2–12.
23. Verdun F.R., Racine D., Ott J.G. [et al.] Image quality in CT: From physical measurements to model observers. Phys. Med., 2015, Vol. 31, № 8, pp. 823–843.
24. Thompson J.D., Chakraborty D.P., Szczepura K. Effect of reconstruction methods and x-ray tube current-time product on nodule detection in an anthropomorphic thorax phantom: A crossed-modality JAFROC observer study. Med. Phys., 2016, Vol. 43, № 3, pp. 1265–74.
25. Kalender W.A. Computed tomography: fundamentals, system technology, image quality, applications. 3rd Rev. Edition. Wiley-VCH. Weinheim, 2011, 220 p.
26. AutomA / SmartmA Theory. GE Healthcare. TiP Training in Partnership: [http://www3.gehealthcare.co.uk/~media/documents/us-global/education/education/product-education-clinical/tip-app-library/gehealthcare-education-tip-app-library\\_ct-automa-smartma-theory.pdf](http://www3.gehealthcare.co.uk/~media/documents/us-global/education/education/product-education-clinical/tip-app-library/gehealthcare-education-tip-app-library_ct-automa-smartma-theory.pdf). (дата обращения: 19.01.2019).
27. Patient-centered CT imaging: New methods for patient-specific optimization of image quality and radiation dose. Philips. Patient: [https://pdfs.semanticscholar.org/a667/eb157c75631edb1b395805f1c01d0d9afaff.pdf?\\_019243.1902139287.1536743765-1954444880.1525541511](https://pdfs.semanticscholar.org/a667/eb157c75631edb1b395805f1c01d0d9afaff.pdf?_019243.1902139287.1536743765-1954444880.1525541511) (дата обращения: 19.01.2019).
28. DeWerd L.A., Kissick M. The phantoms of medical and health physics: devices for research and development. New York: Springer, 2014, 286 p.
29. RadiAnt DICOM Viewer. User manual. Version 4.6.5.: <https://www.radiantviewer.com/> (дата обращения 19.01.2019).
30. Solomon J.B., Li X., Samei E. Relating noise to image quality indicators in CT examinations with tube current modulation. Med. Phys. and Informat., 2013, Vol. 200, pp. 592–600.

Поступила: 22.10.2018 г.

**Чипига Лариса Александровна** – 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. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: larisa.chipiga@gmail.com

**Для цитирования:** Чипига Л.А. Исследование программ автоматической модуляции силы тока для оптимизации протоколов сканирования в компьютерной томографии // Радиационная гигиена. – 2019. – Т.12, №1. – С. 104-114. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-104-114

## Evaluation of tube current modulation programmes for the optimization of scan protocols in computed tomography

Larisa A. Chipiga

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

*Computed tomography (CT) is commonly associated with relatively high patient doses. In order to keep the patient doses from the CT examinations on the acceptable level it is necessary to apply the principle of optimization. An essential part of optimization is the achievement of the compromise between the patient dose reduction and the maintenance of the image quality that provides accurate diagnostic information. The aim of the study was to determine the relations between the patient doses, CT image quality and the parameters of the tube current modulation program (Auto mA, CareDose and DoseRight) for the examination of the chest. The study was performed on the three most common modern tomographs in Russia: Ingenuity Core 128, Philips; Optima 64, General Electric; Definition AS, Siemens. The anthropomorphic phantom Lungman (Kyoto Kagaku CO., LTD) was used in the study. In order to assess the tube current modulation for the range of tube voltage (80–120 kV), the reference mAs (ref. mAs), Noise Index (NI) and Dose Right Index (DRI) were changed for the CareDose (Siemens), Auto mA (GE) and RightDose (Philips), respectively. Estimation of the effective dose was performed using the method from Methodical guidance 2.6.1.2944-11 (MU 2.6.1.2944-11). In order to evaluate the image quality, the noise of a CT image in the mediastinum was selected as the most homogenous for chest region. It was estimated, that for the GE units with Auto mA, the noise of CT image had a liner relationship with NI; the patient dose decreased with the increase of NI. For the Siemens units with CareDose, the noise of CT image decreased with the ref.mAs for the range of tube voltage (80–120 kV); the patient dose was directly proportional to the ref.mAs and increased with the tube voltage. For the Philips units with DoseRight, the noise of CT image decreased with the DRI for the range of tube voltage (80–120 kV); the patient dose was directly proportional to the DRI and had no dependence on the tube voltage. The tube current modulations are proprietary for each manufacturer; it is necessary to consider them for the protocol development. The obtained dependences could be useful for optimization of CT protocols.*

**Key words:** computed tomography, effective dose, image quality, image noise, tube current modulation anthropomorphic fantom.

### References

- Propop M., Galansky M. Helical and multislice computed tomography. Ed. by A.V. Zubareva, Sh.Sh. Shotemora. Moscow, MEDpress-inform, 2006, 412 p. (In Russian)
- Kostylev V.A., Narkevich B.A. Medical physics. Moscow: Meditsina, 2008, 464 p. (In Russian)
- Medical radiology (the basics of radiology and radiation therapy). Handbook, 2nd ed. Moscow: Meditsina, 2000, 672 p. (In Russian)
- Barkovsky A.N. [et al.] Radiation doses of the population of the Russian Federation in 2017: Handbook. St. Petersburg: Institute of Radiation Hygiene, 2018 (in Russian).
- Balonov M., Golikov V., Zvonova I., [et. al.] Patient doses from medical examinations in Russia: 2009–2015. J. Radiol. Prot., 2018, Vol. 38, pp. 121–139.
- Chipiga L., Bernhardsson C. Patient doses in computed tomography examinations in two regions of the Russian Federation. Rad. Prot. Dosim., 2016, Vol. 169, № 1-4, pp. 240–244.
- NCRP Report No. 160, Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States, 2009, National Council on Radiation Protection and Measurements: Bethesda, MD. PMID: 19509507.
- Radiation Protection 180 pt. 1. Medical radiation exposure of the European population. European Commission, 2014, 181 p.
- Quality assurance programme for computed tomography: diagnostic and therapy applications. Vienna. International Atomic Energy Agency, 2012, 192 p.
- Hyun W.G. CT Radiation Dose Optimization and Estimation: an Update for Radiologists. Korean J. Radiol., 2012, Vol. 13, №1, pp. 1–11.
- Kalender W.A., Buchenau S., Deak P. [et.al.] Technical approaches to the optimisation of CT. Phys. Med., 2008, Vol. 24, № 2, pp. 71–79.
- Yu L., Liu X., Leng S. [et. al.] Radiation dose reduction in computed tomography: techniques and future perspective. Imaging Med., 2009, Vol. 1, № 1, pp. 65–84.

13. Martin C. J. The importance of radiation quality for optimisation in radiology. *Biomed. Imaging. Interv. J.*, 2007, Vol. 3, № 2, pp. e38.
14. AAPM report №96. The Measurement, Reporting, and Management of Radiation Dose in CT / AAPM task group 23, American Association of Physicists in Medicine, One Physics Ellipse, 2008, 34 p.
15. Martin C.J., Sookpeng S. Setting up computed tomography automatic tube current modulation systems. *J. Radiol. Prot.*, 2016, Vol. 36, № 3, pp. R74–R95.
16. Papadakis A. E. Automatic exposure control in CT: the effect of patient size, anatomical region and prescribed modulation strength on tube current and image quality. *Eur. Radiol.*, 2014, Vol. 24, № 10, pp. 2520–2531.
17. Rizzo S. Comparison of angular and combined automatic tube current modulation techniques with constant tube current CT of the abdomen and pelvis. *Am. J. Roentgenol.*, 2006, Vol. 186, pp. 673–679.
18. Singh S. Automatic exposure control in CT: applications and limitations. *J. Am. Coll. Radiol.*, 2011, Vol. 8, pp. 446–449.
19. Söderberg M., Gunnarsson M. Automatic exposure control in computed tomography – an evaluation of systems from different manufacturers. *Acta. Radiol.*, 2010, Vol. 51, № 6, pp. 625–634.
20. Söderberg M. Overview, practical tips, and potential pitfalls of using automatic exposure control in CT – Siemens CARE Dose 4D. *Radiat. Prot. Dosimetry.*, 2016, Vol. 169, № 1–4, pp. 84–91.
21. Stratis A., Kottou S., Molfetas M. The effect of a combined tube current modulation system on dose delivered to patients undergoing thoracic and abdominal CT with a 128-slice scanner. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 2013, Vol. 153, № 2, pp. 206–211.
22. Metz C.E. ROC analysis in medical imaging: a tutorial review of the literature. *Radiol. Phys. Technol.*, 2008, Vol. 1, № 1, pp. 2–12.
23. Verdun F.R., Racine D., Ott J.G. [et al.] Image quality in CT: From physical measurements to model observers. *Phys. Med.*, 2015, Vol. 31, № 8, pp. 823–843.
24. Thompson J.D., Chakraborty D.P., Szczepura K. Effect of reconstruction methods and x-ray tube current-time product on nodule detection in an anthropomorphic thorax phantom: A crossed-modality JAFROC observer study. *Med. Phys.*, 2016, Vol. 43, № 3, pp. 1265–74.
25. Kalender W.A. *Computed tomography: fundamentals, system technology, image quality, applications*. 3rd Rev. Edition. Wiley-VCH. Weinheim, 2011, 220 p.
26. *Automa / SmartmA Theory*. GE Healthcare. TiP Training in Partnership. -Available on: [http://www3.gehealthcare.co.uk/~media/documents/us-global/education/education/product-education-clinical/tip-app-library/gehealthcare-education-tip-app-library\\_ct-automa-smartma-theory.pdf](http://www3.gehealthcare.co.uk/~media/documents/us-global/education/education/product-education-clinical/tip-app-library/gehealthcare-education-tip-app-library_ct-automa-smartma-theory.pdf). (Accessed: 19.01.2019).
27. Patient-centered CT imaging: New methods for patient-specific optimization of image quality and radiation dose. Philips. Patient. – Available on: [https://pdfs.semanticscholar.org/a667/eb157c75631edb1b395805f1c01d0d9afaff.pdf?\\_5019243.1902139287.1536743765-1954444880.1525541511](https://pdfs.semanticscholar.org/a667/eb157c75631edb1b395805f1c01d0d9afaff.pdf?_5019243.1902139287.1536743765-1954444880.1525541511) (Accessed: 19.01.2019).
28. DeWerd L.A. *The phantoms of medical and health physics: devices for research and development* / L. A. DeWerd, M. Kissick. – New York: Springer, 2014. 286 p.
29. *RadiAnt DICOM Viewer*. User manual. Version 4.6.5. – Available on: <https://www.radiantviewer.com/> (Accessed: 19.01.2019).
30. Solomon J.B., Li X., Samei E. Relating noise to image quality indicators in CT examinations with tube current modulation. *Med. Phys. and Informat.*, 2013, Vol. 200, pp. 592–600.

Received: October 22, 2018

**For correspondence: Larisa A. Chipiga** – Researcher, Medical protection laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: [larisa.chipiga@gmail.com](mailto:larisa.chipiga@gmail.com))

**For citation: Chipiga L.A. Evaluation of tube current modulation programmes for the optimization of scan protocols in computed tomography. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene*, 2019, Vol. 12, No 1, pp. 104-114. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-104-114**

## Оценка потенциальной радиационной опасности хвостохранилища Дигмай (Таджикистан) для населения, проживающего вокруг него

Х.М. Назаров<sup>1</sup>, К.А. Эрматов<sup>1</sup>, С.М. Бахронов<sup>1</sup>, С.Г. Мухамедова<sup>2</sup>, У.М. Мирсаидов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Агентство по ядерной и радиационной безопасности Академии наук Республики Таджикистан, Душанбе, Республика Таджикистан

<sup>2</sup>Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Россия

*В статье приведены результаты радиационного мониторинга на хвостохранилище Дигмай и ближайшем населенном пункте – поселке Гоziён. Показано, что средняя мощность амбиентной дозы на поверхности хвостохранилища Дигмай достигает 20 мкЗв/ч, плотность потока радона с поверхности материала хвостохранилища достигает 65 Бк/(м<sup>2</sup>·с), при этом объемная активность <sup>222</sup>Rn в атмосферном воздухе над хвостохранилищем на разных участках изменяется от 200 до 1000 Бк/м<sup>3</sup>. Установлено, что удельная активность <sup>238</sup>U в хвостовом материале достигает 980 Бк/кг, а <sup>226</sup>Ra – 7620 Бк/кг. При оценке доз облучения трех гипотетических групп населения, проживающего в поселке Гоziён, учитывались следующие факторы и пути облучения: внешнее облучение, вызванное загрязнением почвы; внутреннее облучение за счет ингаляции <sup>222</sup>Rn и его короткоживущих дочерних продуктов распада, а также долгоживущих радионуклидов с аэрозолями из атмосферного воздуха; внутреннее облучение за счет перорального поступления частиц почвы. Полученные значения годовых доз облучения составляют от 0,4 до 17,0 мЗв/год. При этом наиболее значимый вклад в облучение вносит внешнее гамма-излучение в случае пребывания людей на поверхности хвостохранилища, а также внутреннее облучение за счет ингаляции <sup>222</sup>Rn и его короткоживущих дочерних продуктов распада. Существенным может быть и вклад внутреннего облучения за счет перорального поступления частиц почвы при проведении работ в условиях ветреной погоды и подъема пыли над хвостохранилищем. Годовые дозы облучения для трех гипотетических групп населения можно рассматривать в качестве основы для планирования безопасного времени проведения работ на хвостохранилище на этапе реализации проектов по его реабилитации. Полученная оценка дозы (до 17 мЗв/год) является достаточно высокой и неприемлемой по отношению к принятому пределу дозы безопасного облучения для населения в 1 мЗв/год над природным фоном.*

**Ключевые слова:** радиационный мониторинг, хвостохранилище, мощность амбиентной дозы, объемная активность, удельная активность, радионуклид, уран, радий, радон, годовая доза облучения, гипотетическая группа, плотность потока радона, воздух, почва.

### Введение

Дигмайское хвостохранилище является одним из крупнейших хвостохранилищ отходов уранового производства в Средней Азии. Оно занимает площадь более 90 га и содержит около 35 млн тонн отходов урановых руд, около 500 тыс. тонн забалансовой урановой руды, а также 5,7 млн тонн отходов переработки ванадийсодержащего сырья с общим содержанием около 16 000 ГБк активности. Насыпь считается заполненной на 83% [1].

Поскольку поверхность хвостохранилища является открытой, с его поверхности идет постоянное и существенное выделение радиоактивного газа – радона. Его поступление в атмосферный воздух значительно увеличилось после пересыхания поверхности хвостохранилища, на которой повсеместно образовались трещины глу-

биной до 2 м. Среднее значение плотности потока радона равно 40 Бк/(м<sup>2</sup>·с), годовое поступление радона в атмосферу может составлять 1,13·10<sup>15</sup> Бк. Эти результаты показывают, что проблема радоновыделения может оказаться более острой, чем это оценивалось ранее. Такой исключительно высокий поток радона в атмосферный воздух должен формировать очень высокие концентрации таких его продуктов распада, как <sup>210</sup>Po и <sup>210</sup>Pb в составе атмосферных осадков и аэрозолей, которые осаждаются на прилегающие сельхозугодья и присутствуют в атмосферном воздухе.

В связи с этим возникла необходимость проведения радиационного мониторинга на территории Дигмайского хвостохранилища. С полной остановкой уранового производства на предприятии была прекращена подача пульпы

**Назаров Холмурод Марипович**

Агентство по ядерной и радиационной безопасности Академии наук Республики Таджикистан

Адрес для переписки: 735730, г. Бустон, ул. Оплачук, 1А, Таджикистан; E-mail: holmurod18@mail.ru

и сбросных технологических растворов, что привело к полному испарению прудовых вод и, как следствие, – к увеличению пылевого уноса с поверхности хвостохранилища, значительному возрастанию объемов выделения радона в атмосферу. Вместе с тем, сохранился контакт поровых вод радиоактивных отходов с подземными водами, дополняемый дренированием тела хвостохранилища атмосферными осадками. Эти факторы сохраняют, а в какой-то мере усиливают связанные с хвостохранилищем экологические риски.

**Цель исследования** – оценка потенциальной радиационной опасности хвостохранилища Дигмай для населения поселка Гоziён Б. Гафуровского района Республики Таджикистан.

### Методы отбора проб и исследования

Радоновый мониторинг на объектах проводился с применением как интегрального метода измерения, так и мгновенного метода. Измерение объемной активности (ОА) радона интегральным методом проводилось с помощью комплекса производства венгерской компании «Radosys» с твердотельными трековыми детекторами на основе пластика CR-39 (аллилдигликолькарбонат).

Мгновенные измерения ОА радона проводились с помощью радиометра радона РРА-01М-03. При помощи пробоотборного устройства ПОУ-04 была измерена плотность потока радона (ППР) с поверхности хвостохранилища Дигмай [2]. По результатам замеров ППР на площадках, равномерно распределенных по поверхности хвостохранилища, произведена оценка годового выброса радона.

Измерение мощности амбиентной дозы гамма-излучения осуществлялось дозиметрами МКС-АТ6130 («АТОМТЕХ»), ДКС-96 (НПП «Доза»), ДКС-АТ1123 («АТОМТЕХ»).

### Результаты и обсуждение

В данном исследовании зоны опасности были определены как области с повышенным уровнем радиоактивного загрязнения по сравнению с природным фоном на данной местности. Загрязненность таких участков представляет определенную радиологическую опасность для населения, поскольку присутствие людей на таких территориях или природопользование на таких участках может

приводить к дополнительному облучению. Еще одним источником дополнительного облучения населения могут являться повышенные уровни содержания радионуклидов в водных объектах. В качестве двух оцениваемых участков были выбраны территория Дигмайского хвостохранилища и территория поселка Гоziён.

Одной из важных особенностей Дигмайского хвостохранилища является то, что оно расположено в густонаселенной области. Здесь существует высокий риск загрязнения природных вод за счет значительного скопления отходов бывшего уранового производства в теле хвостохранилища, которое не имеет ни защитного покрытия на поверхности, ни ограждающих конструкций в нижней части. Дигмайское хвостохранилище строилось путем перекрытия ущелья дамбой. Вследствие засушливого климата вода с поверхности хвостохранилища испарилась, а сама поверхность материала хвостохранилища покрылась большими трещинами-такырами, что привело к формированию здесь высокой плотности потока радона с поверхности (36–65 Бк/(м<sup>2</sup>·с)). Объемная активность <sup>222</sup>Rn в атмосферном воздухе над хвостохранилищем на разных участках изменяется от 200 до 1000 Бк/м<sup>3</sup>.

Для Дигмайского хвостохранилища рассматривались следующие факторы повышенной радиологической опасности:

- радиоактивное загрязнение территории прилегающего к хвостохранилищу населенного пункта. В данном случае во внимание принимались лишь некоторые усредненные данные о загрязнении местности и атмосферного воздуха, так как обследование жилых помещений не проводилось;
- содержание природных радионуклидов в материале хвостохранилища и значительное радоновыделение в пределах чаши хвостохранилища;
- радиоактивное загрязнение подземных вод.

### Ситуация на незагрязненных территориях

Усредненные уровни мощности амбиентной дозы гамма-излучения на территориях, которые не подвержены влиянию Дигмайского хвостохранилища, составляют около 0,15 мкЗв/ч. Объемные активности естественных радионуклидов (ЕРН) в воздухе, воде и удельные активности в почве приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Объемная активность ЕРН в воздухе, воде и удельная активность ЕРН в почве в районах, которые наиболее вероятно не подвержены влиянию Дигмайского хвостохранилища**

[Table 1]

**[Activity concentration of natural radionuclides in air, water and soil in areas that are most likely not affected by the Dehmoy tailings pond]**

ЕРН [Natural radionuclide]	Воздух, Бк/м <sup>3</sup> [Air, Bq/m <sup>3</sup> ]	Почва, Бк/кг (с.в.) [Soil, Bq/kg (DW)]	Вода, Бк/м <sup>3</sup> [Water, Bq/m <sup>3</sup> ]
<sup>210</sup> Pb	3,5·10 <sup>-4</sup>	49	–
<sup>210</sup> Po	3,5·10 <sup>-4</sup>	36	–
<sup>226</sup> Ra	0,31·10 <sup>-4</sup>	32	7,0
<sup>228</sup> Th	0,08·10 <sup>-4</sup>	12	–
<sup>230</sup> Th	0,5·10 <sup>-4</sup>	60	–
<sup>234</sup> U	0,32·10 <sup>-4</sup>	13	28
<sup>238</sup> U	0,28·10 <sup>-4</sup>	10	25
<sup>222</sup> Rn	20	–	–

**Мощности ambientной дозы (МАД) гамма-излучения.** Минимальные и максимальные значения МАД, усредненные для каждого из двух оцениваемых участков, приведены в таблице 2. Значения в таблице учитывают данные наблюдений, которые получены группой мониторинга ГУП «Таджредмет».

**Содержание радионуклидов в атмосферном воздухе.** На участке расположения Дигмайского хвостохранилища были выполнены всего несколько измерений объемной активности долгоживущих радионуклидов в воздухе. Отбор проб большого объема был выполнен воздушно-фильтрующими установками на высоте 0,5 м от поверхности грунта на склоне чаши хвостохранилища с относительной отметкой около 1 м над высушенной поверхностью пульпы. Отобранные на фильтры пробы аэрозолей анализировались методами гамма-спектрометрии, которые позволили провести измерения активности таких радионуклидов, как  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{228}\text{Th}$  и др. Активности других радионуклидов уранового ряда в аэрозолях оценивались в предположении равновесия  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  и  $^{210}\text{Pb}/^{210}\text{Po}$ . Фактически отношение  $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$  в аэрозолях может быть в некоторых случаях существенно выше, чем 1. Объемная активность  $^{222}\text{Rn}$  на различных участках хвостохранилища составляла от 200 до 1000 Бк/м<sup>3</sup>. Средние ОА радона в проветриваемых помещениях поселка Гоziён, который наиболее близко расположен к хвостохранилищу, были оценены величиной около 50 Бк/м<sup>3</sup> (рис. 1).

Минимальные и максимальные значения активности ЕРН в пробах воздуха, отобранных на территории хвостохранилища, приведены в таблице 3.

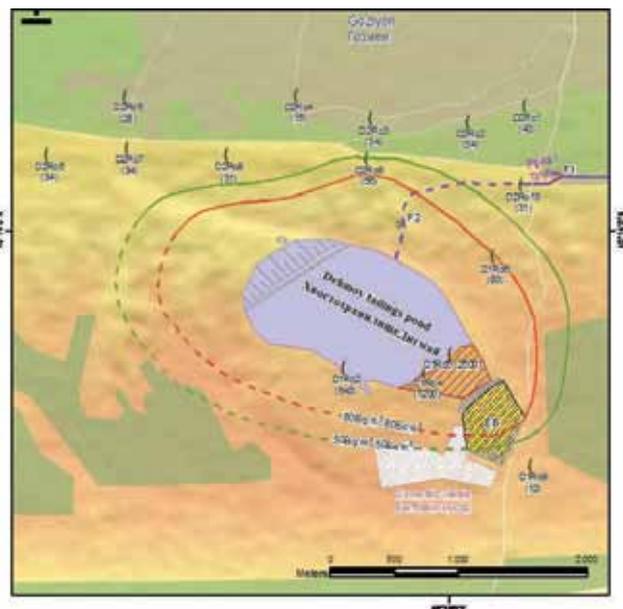


Рис. 1. ОА радона в воздухе на хвостохранилище Дигмай и вокруг него

[Fig 1. Radon concentration in outdoor air at Dehmay tailings pond and around it]

**Содержание радионуклидов в грунтах.** Для анализа грунтов на содержание ЕРН был отобран ряд проб. Минимальные и максимальные значения удельной активности радионуклидов в грунтах (материал хвостохранилища и почва прилегающего к нему поселка) приведены в таблице 4.

Таблица 2

Мощность ambientной дозы (МАД) гамма-излучения на оцениваемых участках вокруг Дигмайского хвостохранилища

[Table 2

Ambient dose rate (ADR) of gamma radiation for the evaluated sites around Dehmay tailings pond]

Объект [Site]	МАД <sub>min</sub> <sup>1</sup> , мкЗв/ч [ADR <sub>min</sub> <sup>1</sup> , μSv/h]	МАД <sub>max</sub> <sup>1</sup> , мкЗв/ч [ADR <sub>max</sub> <sup>1</sup> , μSv/h]
Населенный пункт [Settlement]	0,20	0,50
Хвостохранилище [Tailings pond]	4,00	20,0

Таблица 3

Объемная активность ЕРН в воздухе (ОА) на Дигмайском хвостохранилище и ближайшем поселке

[Table 3

Activity concentration of natural radionuclides in air (C) at the Dehmay tailings pond and the nearest settlement]

ЕРН [Natural radionuclide]	Поселок [Settlement]	Хвостохранилище [Tailings pond]	
	ОА, Бк/м <sup>3</sup> [C, Bq/m <sup>3</sup> ]	ОА <sub>min</sub> <sup>1</sup> , Бк/м <sup>3</sup> [C <sub>min</sub> <sup>1</sup> , Bq/m <sup>3</sup> ]	ОА <sub>max</sub> <sup>1</sup> , Бк/м <sup>3</sup> [C <sub>max</sub> <sup>1</sup> , Bq/m <sup>3</sup> ]
$^{210}\text{Pb}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$9,2 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
$^{210}\text{Po}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$9,2 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
$^{226}\text{Ra}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$4,1 \cdot 10^{-4}$
$^{228}\text{Th}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-5}$	$5,8 \cdot 10^{-5}$
$^{230}\text{Th}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$
$^{234}\text{U}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$
$^{238}\text{U}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-5}$
$^{222}\text{Rn}$	50	200	1000

Таблица 4

Удельная активность ЕРН в материале (УА) Дигмайского хвостохранилища и почве прилегающего к нему поселка

[Table 4]

Activity concentration of natural radionuclides in the material (C) of the Dehmay tailings pond and in the soil of the nearest settlement]

ЕРН [Natural radionuclide]	Поселок [Settlement]	Хвостохранилище [Tailings pond]	
	УА, Бк/кг [C, Bq/kg]	УА <sub>min</sub> , Бк/кг [C <sub>min</sub> , Bq/kg]	УА <sub>max</sub> , Бк/кг [C <sub>max</sub> , Bq/kg]
<sup>210</sup> Pb	98	1,0·10 <sup>4</sup>	1,5·10 <sup>4</sup>
<sup>210</sup> Po	62	1,2·10 <sup>4</sup>	1,3·10 <sup>4</sup>
<sup>226</sup> Ra	65	7,3·10 <sup>3</sup>	7,6·10 <sup>3</sup>
<sup>228</sup> Th	24	2,2·10 <sup>3</sup>	3,2·10 <sup>3</sup>
<sup>230</sup> Th	120	1,1·10 <sup>4</sup>	1,6·10 <sup>4</sup>
<sup>234</sup> U	25	9,5·10 <sup>2</sup>	1,1·10 <sup>3</sup>
<sup>238</sup> U	20	8,2·10 <sup>2</sup>	9,8·10 <sup>2</sup>

Содержание радионуклидов в воде. Низкие уровни содержания радионуклидов (<sup>234</sup>U, <sup>238</sup>U и <sup>226</sup>Ra) в подземных водах на территории поселка, отобранные из нескольких скважин, показали, что загрязненные воды под хвостохранилищем еще не проникли в водоносный горизонт, используемый для питьевого водоснабжения. Результаты представлены таблице 5.

Таблица 5

Удельная активность ЕРН в подземной воде (УА), используемой для питьевого водоснабжения

[Table 5]

Activity concentration of natural radionuclides in groundwater (C) used for drinking]

ЕРН [Natural radionuclide]	УА, мБк/кг [C, mBq/kg]
<sup>226</sup> Ra	150
<sup>234</sup> U	1000
<sup>238</sup> U	1000

Оценки доз облучения. В расчетах учитывались следующие источники и пути облучения:

- внешнее облучение, вызванное загрязнением почвы;
- внутреннее облучение за счет ингаляции <sup>222</sup>Rn и его короткоживущих дочерних продуктов распада (ДПР), а

также долгоживущих радионуклидов с аэрозолями из атмосферного воздуха;

- внутреннее облучение за счет перорального поступления частиц почвы.

При оценке доз облучения населения в районе расположения Дигмайского хвостохранилища рассматривались три гипотетические группы:

Группа 1. Население п. Гоziён, которое не посещает поверхность хвостохранилища.

Группа 2. Жители п. Гоziён, которые могут пребывать не менее 8 ч в неделю (порядка 1 ч в день) на поверхности хвостохранилища.

Группа 3. Жители п. Гоziён, которые будут привлекаться для выполнения реабилитационных работ на хвостохранилище в течение не менее 6 ч в день в течение 4 рабочих дней каждую неделю.

В таблице 6 приведены данные о продолжительности пребывания различных гипотетических групп населения п. Гоziён на территории хвостохранилища и в поселке, где они проживают.

Расчетные величины мощностей дозы облучения от различных источников на выбранных участках потенциального облучения за счет влияния Дигмайского хвостохранилища приведены в таблице 7.

Таблица 6

Продолжительность пребывания различных гипотетических групп населения п. Гоziён на участках потенциального облучения

[Table 6]

Duration of stay of various hypothetical groups of population of the Goziyon village on the areas of potential exposure]

Гипотетическая группа [Hypothetical group]	В окрестностях хвостохранилища [Outdoors nearby the tailings pond]	Внутри помещений (в жилом доме или на рабочем месте) [Indoors (dwellings or workplaces)]
	Продолжительность пребывания, ч/год [Duration of stay, h/year]	
1	0	8760
2	416	8344
3	1104	7656

Ожидаемые годовые дозы облучения представителей трех гипотетических групп населения п. Гоziён, проживающего в зоне влияния Дигмайского хвостохранилища, приведены в таблице 8.

Как видно из таблицы 8, годовые дозы облучения представителей трех гипотетических групп населения п. Гоziён составляют от 0,4 до 17,0 мЗв/год. Наиболее значимый вклад в облучение вносит внешнее гамма-излучение в случае пребывания людей на поверхности хвостохранилища, которое может сопровождаться высокими дозами внутреннего облучения за счет ингаляционного поступления радона и его ДПР. Существенным может быть и вклад внутреннего облучения за счет перорального поступления частиц почвы при проведении работ в условиях ветреной погоды и подъема пыли над хвостохранилищем.

### **Заклучение**

Годовые дозы облучения трех гипотетических групп населения п. Гоziён, проживающего в зоне влияния Дигмайского хвостохранилища, можно рассматривать в качестве основы для планирования безопасного времени проведения работ на хвостохранилище на этапе реализации проектов его реабилитации. Полученная оценка дозы (до 17 мЗв/год) является достаточно высокой и неприемлемой по отношению к принятому пределу дозы безопасного облучения для населения в 1 мЗв/год над природным фоном. Данная оценка является также близкой к дозе, рекомендуемой в качестве предела безопасности для персонала в виде ограничения в 20 мЗв/год над природным фоном [3].

**Расчетные величины мощностей дозы облучения от различных источников на территории п. Гоziён и территории Дигмайского хвостохранилища**

Таблица 7

[Table 7

**Estimated dose rates from different sources on the territory of the Goziyon village and on the territory of the Dehmoy tailings pond]**

Участок потенциального облучения [Site of potential exposure]	Источник облучения [Source of exposure]	Мощность дозы, мкЗв/ч [Dose rate, µSv/h]	
		min	max
Поселок [Settlement]	Внешнее гамма-излучение [External gamma radiation]	0,03	0,21
	Долгоживущие ПРН в воздухе [Long-lived natural radionuclides in air]	0,0055	0,0055
	Радон [Radon]	0	0,094
	Проглатывание частиц почвы [Ingestion of soil particles]	0,00076	0,00076
	Всего [Total]	0,036	0,31
Хвостохранилище [Tailings pond]	Внешнее гамма-излучение [External gamma radiation]	2,3	12
	Долгоживущие ПРН в воздухе [Long-lived natural radionuclides in air]	0,0061	0,0086
	Радон [Radon]	0,25	1,2
	Проглатывание частиц почвы [Ingestion of soil particles]	0,17	0,23
	Всего [Total]	2,7	13

**Ожидаемые годовые дозы облучения гипотетических групп населения п. Гоziён**

Таблица 8

**Estimated annual doses for the hypothetical groups of population of the Goziyon village]**

[Table 8

Гипотетическая группа [Hypothetical group]	Доза облучения, мЗв/год [Dose, mSv/year]		Вклад различных источников облучения, % [Contribution of different sources, %]		
	min	max	Внешнее гамма-излучение [External gamma radiation]	Радон [Radon]	Другие [Other]
1	0,4	2,8	66	29	5
2	1,5	8,2	82	16	2
3	3,4	17,0	86	12	2

Литература

1. Паспорта радиоактивных хвостохранилищ Северного Таджикистана. Агентство по ядерной и радиационной безопасности АН Республики Таджикистан. – Душанбе, 2004. – 6 с.
2. Назаров, Х.М. Оценка потенциальной радиационной опасности бывших урановых объектов для населения г. Истиклол Республики Таджикистан / Х.М. Назаров, К.А. Эрматов, Д.А. Саломов, С.М. Бахронов, У.М. Мирсаидов // Радиационная гигиена. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 83–90.
3. Нормы радиационной безопасности (НРБ-06 СП 2.6.1.001-06): зарег. 16.01.2007 г. – Душанбе: Минюст Республики Таджикистан, 2007. – 172 с.

Поступила: 01.10.2018 г.

**Назаров Холмурод Марипович** – главный научный сотрудник Филиала Агентства по ядерной и радиационной безопасности АН Республики Таджикистан в Согдийской области. **Адрес для переписки:** 735730, г. Бустон, ул. Оплачук, 1А, Таджикистан; E-mail: holmurod18@mail.ru

**Эрматов Комилджон Абдулмаликович** – младший научный сотрудник Филиала Агентства по ядерной и радиационной безопасности АН Республики Таджикистан в Согдийской области, Душанбе, Республика Таджикистан

**Бахронов Соджидхон Манонджонович** – младший научный сотрудник Агентства по ядерной и радиационной безопасности АН Республики Таджикистан, Душанбе, Республика Таджикистан

**Мухамедова Светлана Галиевна** – доктор биологических наук, профессор кафедры гистологии, цитологии и эмбриологии, Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Россия

**Мирсаидов Улмас Мирсаидович** – главный научный сотрудник Агентства по ядерной и радиационной безопасности АН Республики Таджикистан, Душанбе, Республика Таджикистан

**Для цитирования:** Назаров Х.М., Эрматов К.А., Бахронов С.М., Мухамедова С.Г., Мирсаидов У.М. Оценка потенциальной радиационной опасности хвостохранилища Дигмай (Таджикистан) для населения, проживающего вокруг него // Радиационная гигиена. – 2019. – Т. 12, № 1. – С.115-121. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-115-121

**Assessment of the potential radiation hazard of the Dehmoy tailings pond (Tajikistan) for the population living around it**

Kholmurod M. Nazarov<sup>1</sup>, Komildzhon A. Ermatov<sup>1</sup>, Sodzhidkhon M. Bakhronov<sup>1</sup>, Svetlana G. Mukhamedova<sup>2</sup>, Ulmas M. Mirsaidov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Nuclear and Radiation Safety Agency of Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

<sup>2</sup>First Moscow State University after I.M. Sechenov of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow, Russia

*The paper presents results of radiation monitoring of the Dehmoy tailings pond and the nearest inhabited locality, Goziyon village. It is shown that the average gamma dose rate on the surface of Dehmoy tailings pond reaches 20  $\mu\text{Sv/h}$ , density of radon flux from the surface reaches 65  $\text{Bq}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , and the outdoor radon concentration at the Dehmoy tailings pond varies from 200 to 1000  $\text{Bq}/\text{m}^3$ . It was found that the activity concentration of  $^{238}\text{U}$  in the tailing material reaches 980  $\text{Bq}/\text{kg}$  and the activity concentration of  $^{226}\text{Ra}$  reaches 7620  $\text{Bq}/\text{kg}$ . Potential doses for three hypothetical groups of the population living in the village of Goziyon were assessed and the following sources and ways of exposure were taken into account: external gamma radiation due to soil contamination; internal exposure due to inhalation of  $^{222}\text{Rn}$  and its progeny, as well as long-lived radionuclides with aerosols from atmospheric air; internal exposure due to ingestion of soil particles. The hypothetical doses range from 0.4 to 17.0  $\text{mSv}/\text{year}$ . The most significant contributors to the dose are the external gamma radiation and the internal exposure due to inhalation of  $^{222}\text{Rn}$  and its progeny. The contribu-*

**Kholmurod M. Nazarov**

Nuclear and Radiation Safety Agency of Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan Branch in Sogd region

**Address for correspondence:** 1A Oplanchuk, Buston, 735730, Tajikistan; E-mail: holmurod18@mail.ru

*tion of internal exposure due to the ingestion of soil particles in the case of working in windy conditions and the lift of dust from the surface of the tailings pond can also be significant. The hypothetical annual doses to three hypothetical groups of the population can be considered as the basis for estimating the safe working time at the tailings pond during its rehabilitation. The calculated dose estimate (up to 17 mSv/year) is rather high and unacceptable compared to the dose limit for the population of 1 mSv/year above the background level.*

**Key words:** radiation monitoring, tailings pond, gamma dose rate, activity, concentration, radionuclide, uranium, radium, radon, annual dose, hypothetical group, density of radon flux, air, soil.

## References

1. Passports of radioactive tailings ponds of Northern Tajikistan. Nuclear and Radiation Safety Agency of Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. Dushanbe, 2004. 6 p. (In Russian)
2. Nazarov K.M., Ermatov K.A., Salomov D.A., Bahronov S.M., Mirsaidov U.M. Assessment of potential radiation hazard of the former uranium facilities for the population of the Istiklol city of the republic of Tadjhikistan. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2018;11(2):83-90. (In Russian)
3. Radiation Safety Norms (NRB-06 SR 2.3.1.001-06): regist. 16.01.07. Dushanbe: Ministry of Justice of Republic of Tajikistan, 2007, 172 p. (In Russian)

Received: October 01, 2018

**For correspondence: Kholmurod M. Nazarov** – principal researcher, Nuclear and Radiation Safety Agency of Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, Branch in Sogd region (1A Oplanchuk, Buston, 735730, Tajikistan; E-mail: holmurod18@mail.ru)

**Komildzhon A. Ermatov** – junior research worker of Nuclear and Radiation Safety Agency of Academy of Sciences of the Republic of Tadjhikistan Branch in Soghd region, Buston, Tajikistan

**Sodzhidkhon M. Bakhronov** – junior researcher of Nuclear and Radiation Safety Agency of Academy of Sciences of the Republic of Tadjhikistan, Dushanbe, Tajikistan

**Svetlana G. Mukhamedova** – Doctor of biological sciences, professor of the cathedra of histology, cytology and embryology of the First Moscow state university after I.M. Sechenov of Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow, Russia

**Ulmas M. Mirsaidov** – principal research worker of Nuclear and Radiation Safety Agency of Academy of Sciences of the Republic of Tadjhikistan, Buston, Tajikistan

**For citation: Nazarov Kh. M., Ermatov K. A., Bahronov S.M., Mukhamedova S.G., Mirsaidov U.M. Assessment of the potential radiation hazard of the Dehmoy tailings pond (Tajikistan) for the population living around it. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene, 2019, Vol. 12, No. 1, pp.115-121. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-115-121**

## Предложения по включению в НРБ-2019 раздела по радиогенному риску

А.Т. Губин, В.А. Сакович

Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены  
Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

*В статье проводится анализ использования понятий и величин, применяемых в НРБ-99/2009 и ряде методических документов по оценке рисков, связанных с облучением. Сделан вывод, что в НРБ-99/2009 нарушена логика в изложении данного вопроса. Она может быть восстановлена, если ввести в разрабатываемые НРБ-2019 специальный раздел с более подробным освещением терминологических и методических аспектов оценки таких рисков. Проект раздела приложен к данной статье. В нём введён ряд новых терминов (радиогенный риск, номинальный радиогенный риск, радиогенный риск смерти от рака и радиогенный риск заболевания раком и ряд других) с чёткой трактовкой их смысла и предназначения, а также области применения соответствующих им величин. В проекте предложено заменить термин «обобщённый риск» на термин «радиационный риск», что более соответствует его смыслу. Приведены также конкретные формулы для расчёта радиогенного риска. Из-за громоздкости они могут быть вынесены в приложение к НРБ-2019 или в методические указания, подготовленные в развитие положений НРБ-2019.*

**Ключевые слова:** радиационный риск, радиогенный риск, интенсивность заболеваемости раком, интенсивность смертности от рака, Нормы радиационной безопасности.

### Введение

В 2019 г. завершается срок действия отечественных Норм радиационной безопасности (НРБ-99/2009)<sup>1</sup>. Соответственно, проводится работа по совершенствованию этого важнейшего для радиационной безопасности отечественного документа [1]. К вопросам совершенствования, на наш взгляд, следует отнести и чёткое определение в НРБ понятий и алгоритмов использования величин, характеризующих риски в радиационной безопасности, включая моделирование связанных с облучением рисков заболеть солидным раком и рисков умереть от солидного рака. В данной статье проводится обоснование включения в НРБ-2019 специального раздела на эту тему и приложен проект такого раздела.

Критическое отношение к использованию понятия «радиационный риск» в НРБ-99<sup>2</sup> было высказано нами почти сразу после их утверждения [2]. Некоторые нелогичности и внутренние противоречия сохранились и в НРБ-99/2009. Однако с точки зрения нормирования это почти не имеет значения, т.к. и этой версией НРБ не предусмотрено практическое применение содержащихся в ней значений коэффициентов риска, индивидуального пожизненного риска, граничных значений обобщенного риска, уровня пренебрежимо малого риска.

Так, в НРБ-99/2009 (п. 2.3) дана таблица без наименования (и без номера), в которой, как указано, приведены линейные коэффициенты радиационного риска, связывающие риск стохастических эффектов с дозой. Эта табли-

<sup>1</sup> Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарные правила и нормативы. СанПиН 2.6.1.2523-99. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с. [Norms of radiation safety (NRB99/2009). Sanitary rules and norms. SanPiN 2.6.1.2523-99. Moscow, Federal center of hygiene and epidemiology of Rosmotrebnadzor, 2009, 100 p.]

<sup>2</sup> Нормы радиационной безопасности (НРБ-99). Гигиенические нормативы. СП 2.6.1.758-99. М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России, 1999. 116 с. [Norms of radiation safety (NRB-99). Hygienic norms. SP 2.6.1.758-99. Moscow, Center of sanitary-hygienic norming, hygienic certification and expertize of Ministry of Healthcare of Russia, 1999, 116 p.]

**Губин Анатолий Тимофеевич**

Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены, Федеральное медико-биологическое агентство России.

**Адрес для переписки:** 123182, Россия, Москва, ул. Щукинская, д. 40; E-mail: atgubin@rambler.ru

ца повторяет таблицу 1 в Публикации МКРЗ 2007 г. [3], где содержатся «скорректированные на ущерб коэффициенты номинального риска для стохастических эффектов...». В НРБ-99/2009 смысл этих коэффициентов не прояснён, в то время как определение «номинальный» здесь является принципиально важным. В Публикации МКРЗ [3] разъяснению его смысла посвящён специальный подраздел 3.2.3 (не будем его пересказывать). Завершается он так: «... Комиссия рекомендует, чтобы аппроксимированный суммарный коэффициент риска смерти  $5\% \text{ Зв}^{-1}$ , служащий основой для современных международных норм безопасности, по-прежнему использовался для целей радиационной защиты» (п. (87)).

В НРБ-99/2009 эта рекомендация как бы реализована, поскольку указано: «Усредненная величина коэффициента риска, используемая для установления пределов доз персонала и населения, принята равной  $0,05 \text{ Зв}^{-1}$ ». В действительности же пределы доз были установлены ранее федеральным законом<sup>3</sup>, и правильнее было бы написать, что «если использовать указанное значение коэффициента номинального риска, то пределу доз для работников (персонала) при длительности трудовой деятельности 50 лет соответствует пожизненный номинальный радиационный риск, равный  $5\%$ »<sup>4</sup>.

Более того, без разъяснений методологии обоснования коэффициентов номинального риска, чему в Публикации МКРЗ, в отличие от НРБ-99/2009, уделено много внимания, размещение в них упомянутой выше таблицы почти бесполезно. Мало практического смысла и в установленных в НРБ-99/2009 граничных значениях годового обобщённого риска, т.к. для этого требуются модели вероятности и размера событий, приводящих к облучению (таковые стандартизованы только для протонных солнечных событий при космических полётах за пределами магнитосферы Земли<sup>5</sup>). Как минимум необходимо хотя бы в общих чертах указать способ оценки такого риска.

Определение значений риска предусмотрено «Порядком разработки радиационно-гигиенических паспортов организаций и территорий»<sup>6</sup>, который установлен ещё в 1997 г. и позднее конкретизирован для терри-

торий и групп населения, подверженных повышенным уровням воздействия ионизирующих излучений, межведомственным приказом<sup>7</sup>. Этот приказ в п. 3.28 предписывает указывать в п. 8 радиационно-гигиенического паспорта индивидуальный и коллективный риск стохастических последствий для персонала организации и лиц из населения, проживающего в зоне наблюдения, рассчитывая его с использованием коэффициентов  $0,056 \text{ Зв}^{-1}$  и  $0,073 \text{ Зв}^{-1}$  соответственно. С действующими НРБ эти значения явно не согласуются, и неизвестно, какой риск имеется в виду, т.е. риск смерти, заболевания или номинальный. При этом очевидно, что умножение дозы на постоянный коэффициент не даёт дополнительной информации о радиационной безопасности организаций и территорий, что ожидается от радиационно-гигиенических паспортов.

Другое дело, если учитывать фактическую, имеющую место зависимость пожизненного риска от возраста облучения, которая обусловлена как зависимостью от возраста облучения радиогенной интенсивности заболеваемости (ИЗ) раком и радиогенной интенсивности смертности (ИС) от рака, так и уменьшением функции дожития с возрастом для конкретного контингента населения. Публикация моделей ИС от рака в Докладе НКДАР ООН 1994 г. [4], которые основаны на данных для японской когорты (далее – LSS), дала основание разработать компьютерную программу АРМИР для расчёта индивидуального пожизненного риска с учётом режима облучения индивида во времени (в течение периода профессиональной деятельности) [5]. В 2009 г. в системе Госкорпорации «Росатом» была утверждена «Форма ведомственного статистического наблюдения 10-РТБ-5 [6], в которой для расчёта радиационного риска рекомендовано использовать информационно-аналитическую систему на основе АРМИР. Однако легитимность такой системы может вызывать сомнения, поскольку она основана на фактически произвольном выборе моделей риска.

С использованием моделей, предложенных в Докладе НКДАР ООН 2006 г. [7], были разработаны и утверждены в 2012 г. Методические указания<sup>8</sup>, предназначенные «для

<sup>3</sup> Федеральный закон от 9 января 1996 г. №3-ФЗ «О радиационной безопасности населения». Собрание законодательства Российской Федерации, 1996, № 3, ст. 141. [Federal Law №3-FZ, 09.01.1996 "On the radiation safety of the public". Compendium of the legislative acts of the Russian Federation, 1996, №3, chapter 141]

<sup>4</sup> В этом случае пределу годовой дозы для населения при принятой в законе средней продолжительности жизни 70 лет соответствует существенно меньший пожизненный риск – только  $0,35\%$ . [In that case annual dose limit for the public considering the average lifespan of 70 years corresponds to significantly lower lifetime attributable risk –  $0,35\%$ .]

<sup>5</sup> ГОСТ 25645.134-86 БРЭКАКП. Лучи космические солнечные. Модель потоков протонов. М. Госстандарт СССР, 1986. [GOST 25645.134-86. Solar cosmic rays. Model of the proton fluence. M. Gosstandart of the USSR, 1986.]

<sup>6</sup> Порядок разработки радиационно-гигиенических паспортов организаций и территорий (утв. постановлением Правительства Российской Федерации от 28 января 1997 года № 93). [Procedures of the development of the radiation-hygienic passports of facilities and territories (approved by the decree of the Government of the Russian Federation №93, 28.01.1997)].

<sup>7</sup> Приказ Минздрава России, Федерального надзора России по ядерной и радиационной безопасности, Государственного комитета Российской Федерации по охране окружающей среды от 21.06.99 № 239/66/288. [Order of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Federal service of surveillance of the Russian Federation on the nuclear and radiation safety, Governmental committee on the protection of the environment, 21.06.99 № 239/66/288.]

<sup>8</sup> Оценка радиационного риска у населения за счет длительного равномерного техногенного облучения в малых дозах. Методические указания. МУ 2.1.10. 3014–12. М.: ФБУЗ «Федеральный центр гигиены и эпидемиологии» Роспотребнадзора, 2011. 26 с. [Assessment of the radiation risk to the public from the long-term uniform man-made exposure in low doses. Methodical guidelines. MU-2.1.10. 3014 – 12. Moscow, FBUZ "Federal center of hygiene and epidemiology" of Rospotrebnadzor, 2011, 26 p.]

организаций и специалистов, участвующих в анализе данных СГМ, характеризующих влияние радиационного воздействия на здоровье населения». Цель их разработки состояла в установлении единообразия оценок риска возникновения злокачественных новообразований среди населения для использования в СГМ при сравнительной оценке рисков и выявлении причин повышенной заболеваемости в условиях одновременного воздействия различных вредных факторов.

В отечественных и международных документах встречается различное толкование термина «радиационный риск». В НРБ-99/2009 радиационный риск определён как «вероятность возникновения у человека или его потомства какого-либо вредного эффекта в результате облучения», и в принципе термин применим как для стохастических, так и для детерминированных эффектов. Там же в п. 2.3 использовано понятие «обобщённый риск», определённое как произведение вероятности события, приводящего к облучению, и вероятности смерти, связанной с облучением. С целью описания отдалённых неспецифических последствий для здоровья, обусловленных перенесённым облучением, мы считаем предпочтительным использование термина «радиогенный риск», а вместо термина «обобщённый риск» – термина «радиационный риск», что более согласуется с принятой МАГАТЭ терминологией по вопросам безопасности.

Имеется целый ряд других практически важных задач, для решения которых необходимо располагать легитимными моделями и методом оценки рисков возникновения отдалённых последствий с учетом возраста при облучении и достигнутого возраста. Это прежде всего оценка рисков для разных групп лиц, проживающих на территориях радиоактивного загрязнения, и при планировании повышенного облучения лиц из персонала для действий в условиях предотвращения или ликвидации последствий радиационных аварий. Представляет также значительный интерес оценка риска при установлении причинно-следственной связи онкологических заболеваний с перенесёнными облучениями и при обосновании выбора контингентов для профилактики возникновения радиационно-индуцированных заболеваний. Вопрос легитимности моделей и методов оценки рисков в этом случае приобретает особое значение. Очевидно, что без использования понятий радиационного риска и радиогенного риска и методов оценки таких рисков невозможно страхование соответствующих видов деятельности и организаций.

Как известно, при обосновании значений коэффициента номинального риска и тканевых взвешивающих коэффициентов<sup>9</sup> МКРЗ в своих Рекомендациях 2007 г. [3] опиралась прежде всего на данные LSS о заболеваемости раком и данные о смертности от рака за период с 1958 г. по 1998 г. Алгоритм обоснования, который в Рекомендациях МКРЗ изложен словесно, был преобразован нами в математический алгоритм [8], из которого следует, что рекомендованные значения названных коэффициентов пригодны только в случае равномерного во времени (или близкого к нему) облучения. Там же, на при-

мере моделей радиогенной ИС, представленных МКРЗ [3] и НКДАР ООН [7], показано, что при рекомендованном для персонала значении коэффициента номинального риска пожизненный риск от кратковременного облучения в начале периода трудовой деятельности занижается в 1,5 раза, а в конце этого периода завышается примерно в 2 раза.

Продолжение анализа методологии МКРЗ по обоснованию значений названных коэффициентов и моделей позволило выявить ряд противоречий в моделях МКРЗ для ИЗ раком и ИС от рака [9, 10] и послужило причиной разработки квазибиологической модели (КБМ) [11, 12] и метода глобальной подгонки для расчёта значений параметров моделей МКРЗ по данным LSS [13]. Применение указанного метода к данным о смертности от солидных раков в когорте LSS привело к иному, чем приняты МКРЗ, значениям параметров, причём не одинаковым для мужчин и женщин. В работе [14], выполненной с использованием расширенных данных о заболеваемости солидными раками в когорте [15] подобная разница продемонстрирована и для моделей заболеваемости. Результаты расчётов параметров моделей МКРЗ и КБМ методом глобальной подгонки (готовятся к публикации) по этим данным подтвердили наличие существенных гендерных различий в значениях параметров для каждой модели как для заболеваемости солидными раками в целом, так и конкретно для заболеваемости раками системы пищеварения.

В методологическом плане сохраняет актуальность вопрос выбора показателя радиационной безопасности, а именно: когда и как в качестве показателя риска должны использоваться номинальный риск, риск заболевания раком или риск смерти от рака? Очевидно, что выбор должен осуществляться исходя из характера решаемой задачи. При разработке Рекомендаций 2007 г. МКРЗ взяла за основу расчётные риски заболеть разными раками, перейдя от них сначала к рискам смерти, а затем к номинальным рискам путём введения поправок на тяжесть заболевания, потерю лет жизни и нелетальные раки. МКРЗ сохранила значение коэффициента  $0,05 \text{ Зв}^{-1}$  (см. цитату п. 3.2.3, приведённую выше) благодаря переоценке вклада наследственных эффектов в сторону уменьшения. Для системы регулирования радиационной безопасности такие сочетания изменений являются благоприятным обстоятельством, т.к. позволяют сохранять неизменной всю систему. Но для сравнения с рисками в других видах деятельности такие новации нелогичны. Так что риск смерти должен сохранять свою прежнюю значимость наряду с номинальным риском.

Можно согласиться с аргументами МКРЗ в пользу выбора данных о заболеваемости раком в качестве основы для определения радиогенных рисков [3], но их нельзя считать безупречными. Так, совершенствование с годами диагностики рака изменяет статистику заболеваний раком, а прогресс в лечении рака приводит к снижению летальности и увеличению времени дожития. Означает ли это, что должна изменяться оценка радиогенного риска? Очевидно, что риск заболеть раком имеет самостоятельное значение, наряду с номинальным риском и риском смерти.

<sup>9</sup> Мы используем здесь термин, более соответствующий оригиналу Рекомендаций [We propose to use term that is more appropriate to the original of Recommendations]

Что касается методических вопросов проведения оценок риска, то мы постоянно уделяли им внимание в своих публикациях [8, 13, 16, 17], на основе которых были разработаны и утверждены Методические рекомендации<sup>10</sup>. Центральное внимание в них уделено алгоритмическому определению понятий, используемых при оценках радиогенного риска. При этом было учтено, что такие определения были включены в Доклад НКДАР 2006 г.

Текущая стадия анализа названных данных по когорте LSS пока не позволяет рекомендовать конкретные уточнённые модели ИЗ и ИС от рака. Однако, признавая общественную потребность в них и необходимость исследований в этом направлении, считаем целесообразным ввести в проект НРБ-2019 раздел «Показатели радиационного риска и вреда здоровью», включив в него понятия моделей ИЗ раком и ИС от рака без облучения и после облучения как научную основу оценок вреда для здоровья, причиняемого ионизирующим излучением. На наш взгляд, наличие такого раздела (проект представлен в приложении) позволило бы легитимно, с единых позиций разрабатывать методические документы по оценке радиогенных рисков, как при анализе эпидемиологических данных, так и при прогнозировании опасности.

### Литература

1. Заключение международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы радиационной гигиены». 23-24 октября 2018 г., Санкт-Петербург, ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева».
2. Губин, А.Т. Непредставимые фигуры / А.Т. Губин, В.А. Сакович // Атомная энергия. – 2000. – Т. 88, вып. 3. – С. 233-236.
3. Публикация 103 Международной Комиссии по Радиационной защите (МКРЗ) / под общ. ред. М.Ф. Киселева и Н.К. Шандалы. – М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. – 312 с.
4. Source and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR, Report to the General Assembly with Scientific Annexes. UN, New York, 1994.
5. Иванов, В.К. Оптимизация радиационной защиты: «Дозовая матрица» / В.К. Иванов, А.Ф. Цыб, А.П. Панфилов, А.М. Агапов. – М.: ОАО «Издательство «Медицина», 2006. – 304 с.
6. Форма ведомственного (ГК «Росатом») статистического наблюдения 10-РТБ-5 «Сведения о состоянии радиационной и токсической безопасности в организации». Введена в действие Приказом № 1/352-П от 18.10.2010 г.
7. Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Annex A: Epidemiological studies of radiation and cancer. UN, New York, 2008.
8. Губин, А.Т. Методические проблемы практических оценок радиогенного риска / А.Т. Губин, В.А. Сакович // Радиационная гигиена, 2014. – Т. 7, №1. – С. 16-22.
9. Губин, А.Т. Анализ обобщённых моделей радиогенного риска. Часть 1. Модели МКРЗ / А.Т. Губин, В.А. Сакович // Радиация и риск. – 2016. – Т. 25, № 4. – С. 48-60.
10. Губин, А.Т. Анализ обобщённых моделей радиогенного риска. Часть 2. Модели НКДАР ООН / А.Т. Губин, В.А. Сакович // Радиация и риск. – 2016. – Т. 25, № 4. – С. 61-79.
11. Губин, А.Т. Квазибиологическая модель радиогенной заболеваемости раком / А.Т. Губин, В.И. Редько, В.А. Сакович // Радиационная гигиена. – 2015. – Т. 8, № 4. – С. 23-31.
12. Губин, А.Т. Дополнение квазибиологической модели радиогенной заболеваемости раком / А.Т. Губин, В.И. Редько, В.А. Сакович // Радиационная гигиена. – 2017. – Т.10, № 4. – С. 53-56.
13. Губин, А.Т. Метод глобальной подгонки обобщённых моделей радиогенного риска под данные японской когорты / А.Т. Губин // Радиационная гигиена. – 2018. – Т. 11, № 3. – С. 56-73.
14. Grant, E.J., Brenner A. Hiromi Sugiyama et al. Solid Cancer Incidence among the Life Span Study of Atomic Bomb Survivors: 1958–2009. Radiat. Res., 2017. Vol.187, pp. 513-537.
15. Сайт Фонда научных исследований радиационных эффектов: <http://www.rerf.or.jp> (дата обращения 25.10.2017).
16. Губин, А.Т. Адаптация к российскому населению моделей радиационного риска, используемых МКРЗ / А.Т. Губин, В.И. Редько, В.А. Сакович // Радиационная гигиена. – 2014. – Т. 7, № 4. – С. 38-47.
17. Губин, А.Т. Демографические особенности российского населения и их значимость для оценок коэффициентов номинального риска / А.Т. Губин, В.И. Редько, В.А. Сакович // Радиационная гигиена. – 2016. – Т. 9, № 4. – С. 26-36.

Поступила: 18.12.2018 г.

**Губин Анатолий Тимофеевич** – кандидат физико-математических наук, заведующий лаборатории математического моделирования радиационных и химических воздействий, Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены, Федеральное медико-биологическое агентство. **Адрес для переписки:** 123103, Россия, Москва, ул. Щукинская, д.40; E-mail: atgubin@rambler.ru

**Сакович Вадим Алексеевич** – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории математического моделирования радиационных и химических воздействий, Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены, Федеральное медико-биологическое агентство, Москва, Россия

**Для цитирования:** Губин А.Т., Сакович В.А. Предложения по включению в НРБ-2019 раздела по радиогенному риску // Радиационная гигиена. – 2019. – Т. 12, № 1. – С. 122-128. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-122-128

<sup>10</sup>Методические основы разработки документов по определению значений радиогенного риска смерти, обусловленного облучением в пределах, установленных для контролируемых условий. Рекомендации Р ФМБА России 21.07–2016. Москва, 2016. Сакович В.А., Губин А.Т. С. 51. [Methodical framework for the development of the documents on the estimation of the values of the radiogenic risk of death due to the exposure in the limits established for the controlled conditions. Recommendations of the FMBA of Russia. 21.07-2016. Moscow, 2016. Sakovich V.A., Gubin A.T., p. 51]

## Proposals for inclusion in NRB-2019 Section on radiogenic risk

Anatoly T. Gubin, Vadim A. Sakovich

Scientific Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene, Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

*In this article it made analysis of concepts and values used in NRB-99/2009 and a number of national methodological documents on the assessment of risks associated with irradiation. It is concluded that NRB-99/2009 violates the logic in the presentation of this issue. It can be restored if a special section is introduced in the developed NSB-2019, with more detailed coverage of the terminological and methodological aspects of the assessment of such risks. The draft section is attached to this article. In the draft introduces a number of new terms (radiogenic risk, nominal radiogenic risk, radiogenic risk of death from cancer and radiogenic risk of cancer and a number of others) with a clear interpretation of their meaning and purpose, as well as the sphere application of the relevant values. The draft proposes to replace the term generalized risk with radiation risk, which is more in line with its meaning. Given also specific formulas to calculate the radiogenic risk coefficients for different types of irradiation based on the real demographics data for exposed populations. Because of the cumbersome formulas, they can be given to the Annex of the NRB-2019 or issued in methodical instructions prepared in the elaboration of the provisions of the NRB-2019.*

**Key words:** radiation risk, radiogenic risk, intensity of cancer incidence, the intensity of cancer mortality, radiation safety Standards.

### References

1. Conclusion of the international scientific-practical conference "Actual issues of radiation hygiene". 23-24 October 2018., St-Petersburg. Research institute of Radiation Hygiene after P.V. Ramzaev. (In Russian)
2. Gubin A.T., Sakovich V.A. Unimaginable figures. Atomnaya energiya = Atomic energy, 2000, Vol. 88, issue 3, pp. 233-236. (In Russian)
3. ICRP, 2007. 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (Users Edition). ICRP Publication 103 (Users Edition). Ann. ICRP 37 (2-4). (In Russian)
4. Source and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR, Report to the General Assembly with Scientific Annexes. UN, New York, 1994.
5. Ivanov V.K., Tsyb A.F., Panfilov A.P., Agapov A.M. Optimization of the radiation protection: «Dose matrix». Moscow, «Izdatelstvo «Meditsina» = JSC «Medicine Publishing», 2006, 304 p. (In Russian)
6. Form of the departmental (Rosatom) statistical surveillance 10-RTB-5 "Data on the radiation and toxic safety in the facility". Brought into force by the Order № 1/352-P, 18.10.2010. (In Russian)
7. Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Annex A: Epidemiological studies of radiation and cancer. UN, New York, 2008.
8. Gubin A.T., Sakovich V.A. Methodical aspects of the practical radiogenic risk assessment. Radiatsionnaya gigiena = Radiation Hygiene, 2014, Vol. 7, № 1, pp. 16-22. (In Russian)
9. Gubin A.T., Sakovich V.A. Analysis of the generalized models of the radiogenic risk. Part 1. ICRP models. Radiatsiya i risk = Radiation and risk, 2016, Vol. 25, № 4, pp. 48-60. (In Russian)
10. Gubin A.T., Sakovich V.A. Analysis of the generalized models of the radiogenic risk. Part 1. UNSCEAR models. Radiatsiya i risk = Radiation and risk, 2016, Vol. 25, № 4, pp. 61-79. (In Russian)
11. Gubin A.T., Redko V.I., Sakovich V.A. Quasibiological model of the radiogenic cancer morbidity. Radiatsionnaya gigiena = Radiation Hygiene, 2015, Vol. 8, № 4, pp. 23-31. (In Russian)
12. Gubin A.T., Redko V.I., Sakovich V.A. Additions to the quasibiological model of the radiogenic cancer morbidity. Radiatsionnaya gigiena = Radiation Hygiene, 2017, Vol. 10, № 4, pp. 53-56. (In Russian)
13. Gubin A.T. Method of the global approximation of the generalized models of the radiogenic risk to the Japanese cohort data. Radiatsionnaya gigiena = Radiation Hygiene, 2018, Vol. 11, № 3, pp. 56-73. (In Russian)
14. Grant, E.J., Brenner A. Hiromi Sugiyama et al. Solid Cancer Incidence among the Life Span Study of Atomic Bomb Survivors: 1958–2009. Radiat. Res., 2017, Vol. 187, pp. 513-537.
15. Web-site of the Fund of the scientific research of the radiation effects. -Available on: <http://www.rerf.or.jp> (Accessed: 25.10.2017). (In Russian)
16. Gubin A.T., Redko V.I., Sakovich V.A. Adaptation of the ICRP models of the radiation risk to the Russian population. Radiatsionnaya gigiena = Radiation Hygiene, 2014, Vol. 7, № 4, pp. 38-47. (In Russian)
17. Gubin A.T., Redko V.I., Sakovich V.A. Demographic features of the Russian population and their importance for the assessment of the nominal risk coefficients. Radiatsionnaya gigiena = Radiation Hygiene, 2016, Vol. 9, № 4, pp. 26-36. (In Russian)

Received: December 18, 2018

**Anatoly T. Gubin**

Research and technical center of radiation-chemical safety and hygiene of Federal medical biological agency of Russia

**Address for correspondence:** Shchukinskaya str., 40, Moscow, 123182, Russia; E-mail: atgubin@rambler.ru

**For correspondence: Anatoly T. Gubin** – candidate of physical and mathematical sciences, head, laboratory of mathematical modeling of radiation and chemical exposure, scientific and technical center radiation-chemical safety and hygiene, Federal medical biological agency of Russia (Shchukinskaya str., 40, Moscow, 123103, Russia; E-mail: atgubin@rambler.ru)

**Vadim A. Sakovich** – doctor of physical and mathematical sciences, chief research scientist, laboratory of mathematical modeling of radiation and chemical exposure, scientific and technical center radiation-chemical safety and hygiene, Federal medical biological agency of Russia, Moscow, Russia

**For citation: Gubin A.T., Sakovich V.A. Proposals for inclusion in NRB-2019 Section on radiogenic risk. Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene, 2019, Vol. 12, No. 1, pp.122-128. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-122-128**

## Приложение

### Показатели радиационного риска и вреда здоровью

1. В качестве интегральных показателей радиационной опасности используют две величины: радиационный риск и радиогенный риск. Радиационный риск отражает вероятностную природу случайных событий облучения и процесса формирования неблагоприятных последствий для здоровья у облучённых лиц. Радиогенный риск характеризует только вероятность возникновения таких последствий при заданной дозе облучения. Будучи вероятностными величинами, радиационный риск и радиогенный риск не могут быть непосредственно измерены, возможна только их расчётная оценка.

2. Радиационный риск предназначен преимущественно для обоснования безопасности планируемых потенциально радиационно-опасных видов деятельности и объектов и обоснования защиты от источников ионизирующего излучения, а радиогенный риск – для оценки стохастических эффектов, связанных с воздействием ионизирующего излучения на всё население и отдельные его контингенты в ситуациях существующего и планируемого облучения.

3. В качестве количественных показателей радиационной опасности используют следующие величины:

- номинальный радиогенный риска рака, скорректированный на ущерб;
- номинальный радиогенный риск наследственных эффектов;
- совокупный номинальный радиогенный риск;
- пожизненный радиогенный риска смерти от рака;
- пожизненный радиогенный риск заболевания раком
- годовой радиационный риск<sup>11</sup>;

4. Номинальные радиогенный риск рака, радиогенный риск наследственных эффектов и совокупный радиогенный риск предназначены для применения в практике обеспечения радиационной безопасности в контролируемых условиях. В соответствии с линейной беспороговой концепцией перечисленные риски рассчитывают путём умножения дозы на коэффициенты из таблицы, рассчитанные для условного населения<sup>12</sup>.

5. Существует ряд задач, для решения которых необходимо располагать значениями радиогенных рисков для определённого контингента лиц с известными демографическими характеристиками, находящегося в условиях повышенных радиационных воздействий. Пожизненные радиогенные риски заболеть раком и смерти от рака фор-

Таблица

**Коэффициенты номинальных радиогенных рисков для стохастических эффектов облучения при низкой мощности дозы**

[Table

#### Nominal radiogenic risk coefficients for the stochastic effects of low dose rate exposure ]

Контингент [Cohort]	Коэффициенты номинального радиогенного риска рака, $10^{-2} \text{Зв}^{-1}$ [Nominal radiogenic cancer risk coefficients]	Коэффициенты номинального радиогенного риска наследственных эффектов, $10^{-2} \text{Зв}^{-1}$ [Nominal radiogenic hereditary effect risk coefficients]	Коэффициенты совокупного номинального радиогенного риска, $10^{-2} \text{Зв}^{-1}$ [Coefficients of the total nominal radiogenic risk]
Всё население [Whole population]	5,5	0,2	5,7
Работники [Workers]	4,1	0,1	4,2

<sup>11</sup> В НРБ-99/2009 использован термин «Обобщённый риск». [NRB 99/2009 uses the term “generalized risk”]

<sup>12</sup> Значения определены МКРЗ [4] путём усреднения по полу и возрасту оценок пожизненных рисков заболеть различными солидными раками после острого облучения единичной дозой с поправками на летальность, качество жизни и эффекты дозы и мощности дозы. [Values were obtained by the ICRP by averaging by age and gender assessments of the lifetime risk to get various solid cancers after the acute exposure adjusted by the lethality, quality of life and dose rate].

мируются в течение всей жизни из интенсивности радиогенной (дополнительной) заболеваемости (ИЗ) раком или интенсивности радиогенной (дополнительной) смертности (ИС) от рака соответственно. Значения этих рисков вычисляют, суммируя, начиная с возраста их определения, значения годовых радиогенных ИЗ или ИС с учётом функции дожития до каждого года жизни, характерной для данного контингента. Математический алгоритм вычисления пожизненных рисков приведён в дополнении к данному приложению.

6. Зависимость годовых радиогенных ИЗ и ИС от возраста вычисляют как сумму годовых радиогенных ИЗ и ИС, обусловленных облучением в каждом прошедшем году. Для этого используют эпидемиологические модели зависимости годовых радиогенных ИЗ или ИС от возраста и от времени, прошедшего после кратковременного облучения, которые устанавливают для конкретного контингента отдельным методическим документом.

**Дополнение к приложению**

*Формулы для расчёта радиогенных рисков*

В приводимых ниже формулах используются следующие обозначения:

$\mu(t)$  и  $\nu(t)$  – интенсивности смертности (ИС) от всех причин и интенсивности заболеваемости (ИЗ) всеми болезнями в возрасте  $t$  в условиях без облучения;

$\mu_c(t)$  и  $\nu_c(t)$  – интенсивности смертности от рака и интенсивности заболеваемости раком в возрасте  $t$  в условиях без облучения (фоновые интенсивности);

$\Delta\mu_{rc}(t_0, t)$  и  $\Delta\nu_{rc}(t_0, t)$  – радиогенные приращения интенсивности смертности (радиогенная ИС) от рака в возрасте  $t$  и интенсивности заболеваемости (радиогенная ИЗ) раком в этом возрасте в расчёте на единицу дозы для случая кратковременного облучения в возрасте  $t_0$ ;

7. Радиационный риск, связанный с потенциальным облучением, определяют суммированием парциальных вкладов от всех путей такого облучения. При пренебрежимо малом вкладе детерминированных эффектов, годовой радиационный риск рассчитывают по формуле:

$$\Delta R_{II} = k \lambda \bar{D}_{II},$$

где  $k$  – коэффициент номинального радиогенного риска рака, взятый из таблицы;  $\lambda$  (год<sup>-1</sup>) – частота возникновения аварий на радиационно-опасном объекте рассматриваемой категории;  $\bar{D}_{II}$  (Зв<sup>-1</sup>) – доза потенциального облучения репрезентативного лица, усреднённая по всем типам аварий.

8. Для обоснования достаточности защиты от источников потенциального облучения приняты следующие граничные значения годового радиационного риска, связанного с потенциальным облучением:

- персонал –  $2,0 \times 10^{-4}$ , год<sup>-1</sup>;
- население –  $1,0 \times 10^{-5}$ , год<sup>-1</sup>.

$\Delta R_{\mu}(t^*)$  – пожизненный риск смерти от рака для возраста  $t^*$ ;

$\Delta R_{\nu}(t^*)$  – пожизненный риск заболевания раком для возраста  $t^*$ .

$P(t)$  – мощность дозы;

Фоновые показатели ( $\mu(t)$ ,  $\nu(t)$ ,  $\mu_c(t)$ ,  $\nu_c(t)$ ) выбирают на основе текущих статистических данных о заболеваемости и смертности, представительных для рассматриваемого контингента населения. Модели радиогенных приращений интенсивности смертности и заболеваемости, обусловленных кратковременным облучением единичной дозой, задаются в специальных методических указаниях, периодически обновляемых по мере накопления и обобщения данных о возрастных зависимостях радиационных эффектов.

$$\Delta R_{\mu}(t^*) = \int_{t^*}^{\infty} e^{-\int_{t^*}^{\infty} \mu(t') dt'} \left\{ e^{-\int_{t^*}^{t'} P(t'') \Delta\mu_{rc}(t'', t) dt'' dt'} \left[ \mu_c(t) + \int_0^t P(t') \Delta\mu_{rc}(t', t) dt' \right] - \mu_c(t) \right\} dt$$

$$\Delta R_{\nu}(t^*) = \int_{t^*}^{\infty} e^{-\int_{t^*}^{\infty} [\mu(t') + \nu_c(t')] dt'} \left\{ e^{-\int_{t^*}^{t'} P(t'') [\Delta\mu_{rc}(t'', t) + \Delta\nu_{rc}(t'', t)] dt'' dt'} \left[ \nu_c(t) + \int_0^t P(t') \Delta\nu_{rc}(t', t) dt' \right] - \nu_c(t) \right\} dt$$

## 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 болезни, особенно на рисунках или фотографиях. При изложении экспериментов на животных укажите, соответствовало ли содержание и использование лабораторных животных правилам, принятым в учреждении, рекомендациям национального совета по исследованиям, национальным законам.

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. Центр. Международная система единиц (СИ) в атомной науке и технике: Справочное руководство. М.: Энергоиздат, 1981. 200 с.). Все результаты измерений, приводимых в статье, должны быть выражены только в системе СИ.

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. Подрисовочные 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 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание документа. 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 517721-2001. Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Входные и выходные параметры и типы соединений. Технические требования [перевод на английский язык (In Russ.)].

**ПРИМЕРЫ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИХ ССЫЛОК  
Литература** (выравнивание по левому краю)

**Книги и брошюры:**

*Один – три автора:*

Сергеев, И.В. Лучевая диагностика в России / И.В. Сергеев, Т.П. Смирнова, М.Н. Исаков. – СПб.: НИИРГ, 2007. – 123 с.

*Пять и более авторов:*

Сергеев, И.В. Лучевая диагностика в России : учеб. пособие для вузов / И.В. Сергеев [и др.]. – СПб.: Норма, 2007. – 123 с.

**Многотомные издания или на часть книги:**

Пивинский, Ю.Е. Общие вопросы технологии / Ю.Е. Пивинский // Неформальные огнеупоры. – М., 2003. – Т. 1, кн. 1. – С. 430–447.

*Глава или раздел из книги:*

Зайчик, А.Ш. Основы общей патофизиологии / А.Ш. Зайчик, Л.П. Чурилов // Основы общей патологии: учеб. пособие для студентов медвузов. – СПб.: ЭЛБИ, 1999. – Ч. 1., гл. 2. – С. 124–169.

**Книги на английском языке:**

Jenkins PF. Making sense of the chest x-ray: a hands-on guide. New York: Oxford University Press; c 2005. 194 p.

Iverson C, Flanagan A, Fontanarosa PB, et al. American Medical Association manual of style. 9th ed. Baltimore (MD): Williams & Wilkins; c 1998. 660 p.

**Глава или раздел из книги на английском языке:**

Riffenburgh RH. Statistics in medicine. 2nd ed. Amsterdam (Netherlands): Elsevier Academic Press; c 2006. Chapter 24, Regression and correlation methods; p. 447–86.

Ettinger SJ, Feldman EC. Textbook of veterinary medicine: diseases of the dog and cat. 6th ed. St. Louis (MO): Elsevier Saunders; c2005. Section 7, Dietary considerations of systemic problems; p. 553–98.

**Статьи из журнала, сборника:**

*Из журнала:*

Стамат, И.П. К обоснованию нормативов по содержанию природных радионуклидов в облицовочных изделиях и материалах / И.П. Стамат, Д.И. Стамат // Радиационная гигиена. – 2009. – Т. 2, № 1. – С. 46–52.

*Из журнала на английском языке:*

Axelsson, O. Indoor radon exposure and active and passive smoking relation to the occurrence of lung cancer / O. Axelsson [et al.] // Scand. J. Work, Environ and Health. – 1988. – Vol. 14, N 5. – P. 286–292.

Petitti DB, Crooks VC, Buckwalter JG, Chiu V. Blood pressure levels before dementia. *Arch Neurol*. 2005 Jan; 62(1):112-6.

Rastan S, Hough T, Kierman A, et al. Towards a mutant map of the mouse--new models of neurological, behavioural, deafness, bone, renal and blood disorders. *Genetica*. 2004 Sep; 122(1):47-9.

*Из сборника конференций (тезисы):*

Кушинников, С.И. Проблемы достоверности оценки среднегодовой ЭРОА радона при радиационно-гигиеническом обследовании помещений / С.И. Кушинников, А.А. Цапалов // Сборник докладов и тезисов научно-практической конференции «Актуальные вопросы обеспечения радиационной безопасности на территории Российской Федерации», Москва, 25-26 октября 2007 г. – М., 2007. – С. 50-51.

*Из сборника конференций (тезисы) на английском языке:*

Arendt T. Alzheimer's disease as a disorder of dynamic brain self-organization. In: van Pelt J, Kamermans M, Levelt CN, van Ooyen A, Ramakers GJ, Roelfsema PR, editors. Development, dynamics, and pathology of neuronal networks: from molecules to functional circuits. Proceedings of the 23rd International Summer School of Brain Research; 2003 Aug 25-29; Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, Amsterdam, the Netherlands. Amsterdam (Netherlands): Elsevier; 2005. P. 355-78.

Rice AS, Farquhar-Smith WP, Bridges D, Brooks JW. Cannabinoids and pain. In: Dostorovsky JO, Carr DB, Koltzenburg M, editors. Proceedings of the 10th World Congress on Pain; 2002 Aug 17-22; San Diego, CA. Seattle (WA): IASP Press; c 2003. P. 437-68.

**Ссылки на Интернет-ресурсы:**

Официальный сайт Медицинского радиологического научного центра РАМН (МРНЦ РАМН): <http://www.mrrc.obninsk.gi/> (дата обращения: 19.02.2010 г.).

Complementary/Integrative Medicine [Internet]. Houston: University of Texas, M. D. Anderson Cancer Center; c2007 [cited 2007 Feb 21]. Available from: <http://www.mdanderson.org/departments/CIMER/>.

Hooper JF. Psychiatry & the Law: Forensic Psychiatric Resource Page [Internet]. Tuscaloosa (AL): University of Alabama, Department of Psychiatry and Neurology; 1999 Jan 1 [updated 2006 Jul 8; cited 2007 Feb 23]. Available from: <http://bama.ua.edu/~jhooper/>.

Polgreen PM, Diekema DJ, Vandenberg J, Wiblin RT, Chen Y, David S, Rasmus D, Gerdt N, Ross A, Katz L, Herwaldt LA. Risk factors for groin wound infection after femoral artery catheterization: a case-control study. *Infect Control Hosp Epidemiol* [Internet]. 2006 Jan [cited 2007 Jan 5]; 27(1):34-7. Available from: <http://www.journals.uchicago.edu/ICHE/journal/issues/v27n1/2004069/2004069.web.pdf>

Richardson ML. Approaches to differential diagnosis in musculoskeletal imaging [Internet]. Version 2.0. Seattle (WA): University of Washington School of Medicine; c2000 [revised 2001 Oct 1; cited 2006 Nov 1]. Available from: <http://www.rad.washington.edu/mskbook/index.html>

**Статьи, принятые к печати:**

Горский, Г.А. О необходимости радиационного обследования зданий после окончания строительства, капитального ремонта или реконструкции / Г.А. Горский, А.В. Еремин, И.П. Стамат // Радиационная гигиена. – 2010. – Т. 3, № 1. – Деп. 10.02.2010 г.

**Патенты:**

Пат. № 2268031 Российская Федерация, МПК А61Н23.00. Способ коррекции отдаленных последствий радиационного воздействия в малых дозах / Карамуллин М.А., Шутко А.Н., Сосюкин А.Е. и др.; опубл. 20.01.2006, БИ № 02.

**Патенты на английском языке:**

Cho ST, inventor; Hospira, Inc., assignee. Microneedles for minimally invasive drug delivery. United States patent US 6,980,855. 2005 Dec 27.

Poole I, Bissell AJ, inventors; Voxar Limited, assignee. Classifying voxels in a medical image. United Kingdom patent GB 2 416 944. 2006 Feb 8. 39 p.

**Из газеты:**

Фомин, Н.Ф. Выдающийся ученый, педагог, воспитатель / Н.Ф. Фомин, Ф.А. Иванович, Е.И. Веселов // Воен. врач. – 1996. – № 8 (1332). – С. 5.

Фомин, Н.Ф. Выдающийся ученый, педагог, воспитатель / Н.Ф. Фомин, Ф.А. Иванович, Е.И. Веселов // Воен. врач. – 1996. – 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. / Фенухин В.И. – М., 2002. – 215 с. – 04200201565.

Кадука, М.В. Роль грибов в формировании дозы внутреннего облучения населения после аварии на Чернобыльской АЭС : автореф. дисс. ... канд. биол. наук / Кадука М.В. – Обнинск, 2001. – 23 с.

**Диссертация и автореферат диссертации на английском языке:**

Jones DL. The role of physical activity on the need for revision total knee arthroplasty in individuals with osteoarthritis of the knee [dissertation]. [Pittsburgh (PA)]: University of Pittsburgh; 2001. 436 p.

Roguskie JM. The role of Pseudomonas aeruginosa 1244 pilin glycan in virulence [master's thesis].

**23. Второй список литературы (References)** полностью соответствует первому списку литературы. При этом в библиографических источниках на русском языке фамилии и инициалы авторов, а также название журнала и издания должны быть транслитерированы. Название работы (если требуется) переводится на английский язык и/или транслитеруется. Иностранные библиографические источники из первого списка полностью повторяются во втором списке. Более подробно правила представления литературных источников во втором списке представлены ниже.

**Примеры:**

**Книги** (фамилия и инициалы автора транслитерируются, название, место издания и название издательства переводится на английский язык)

Lobzin Yu.V., Uskov A.N., Yushchuk N.D. Ixodes tick-borne borreliosis (etiology, epidemiology, clinical manifestations, diagnosis, treatment and prevention): Guidelines for Physicians. Moscow; 2007 (in Russian).

**Из журналов** (фамилия и инициалы автора транслитерируются, название статьи не приводится, название журнала транслитерируется)

Kondrashin A.V. Meditsinskaya parazitologiya i parazitarnyye bolezni. 2012; 3: 61-3 (in Russian).

**Диссертация** (фамилия и инициалы автора транслитерируются, название диссертации транслитерируется, дается перевод названия на английский язык, выходные данные транслитерируются)

Popov A.F. Tropicheskaya malyariya u neimmunnykh lits (diagnostika, patogenez, lecheniye, profilaktika) [Tropical malaria in non-immune individuals (diagnosis, pathogenesis, treatment, prevention)] [dissertation]. Moscow (Russia): Sechenov Moscow Medical Academy; 2000. 236 p (in Russian).

**Патенты** (фамилия и инициалы авторов, название транслитерируются)

Bazhenov A.N., Ilyushina L.V., Plesovskaya I.V., inventors; Bazhenov AN, Ilyushina LV, Plesovskaya IV, assignee. Metodika lecheniia pri revmatoidnom artrite. Russian Federation patent RU 2268734; 2006 Jan 27 (in Russian).

**Из сборника конференций** (тезисы) (фамилия и инициалы автора транслитерируются, название тезисов транслитерируется и дается перевод названия на английский язык, выходные данные конференции транслитерируются и дается перевод названия на английский язык)

Kiryushenkova VV, Kiryushenkova SV, Khramov MM, et al. Mikrobiologicheskii monitoring vzbuditeley ostrykh kishhechnykh infektsiy u vzroslykh g. Smolenska [Microbiological monitoring of pathogens of acute intestinal infections in adults in Smolensk]. In: Materialy mezhdunarodnogo Yevro-aziatskogo kongressa po infektsionnym boleznyam [International Euro-Asian Congress on Infectious Diseases], Vol. 1. Vitebsk; 2008. P. 53. (in Russian).

Boetsch G. Le temps du malheur: les representations artistiques de l'epidemie. [Tragic times: artistic representations of the epidemic]. In: Guerci A, editor. La cura delle malattie:

itinerari storici [Treating illnesses: historical routes]. 3rd Colloquio Europeo di Etnofarmacologia; 1st Conferenza Internazionale di Antropologia e Storia della Salute e delle Malattie [3rd European Colloquium on Ethnopharmacology; 1st International Conference on Anthropology and History of Health and Disease]; 1996 May 29-Jun 2; Genoa, Italy. Genoa (Italy): Erga Edizione; 1998. P. 22-32. (in French).

**Ответственность за правильность изложения библиографических данных возлагается на автора.**

**Все статьи печатаются в журнале бесплатно.**

Статьи направляются по адресу: 197101, г. Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8, ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В.Рамзаева». Редакция журнала «Радиационная гигиена» и по e-mail: journal@niirg.ru.

Справки по телефону: (812) 233-42-83 и (812) 233-50-16 (редакция журнала «Радиационная гигиена»). Факс: (812) 233-53-63, 233-42-83.