

**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 № 4, 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, академик РАН (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Заместитель главного редактора

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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)

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

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



RADIATION HYGIENE

Vol. 12 № 4, 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, Academician of the Russian Academy of Sciences, M.D., Professor, (Saint Petersburg, Russian Federation)

Deputy Editor-in-Chief

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

Members of Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial Board

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

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

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

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

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. Vakulovsky — 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 Juhan 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, Honored 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 № 4, 2019

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

Власов О.К., Краевский П., Звонова И.А., Малатова И.,
Бартускова М., Шукина Н.В., Чекин С.Ю., Туманов К.А.
**Верификация радиоэкологической модели
на инструментальных данных удельной активности ¹³¹I
в траве в Мазовии и Богемии после аварии на ЧАЭС
(по материалам «Пражского» и «Варшавского»
сценариев проекта МАГАТЭ EMRAS)6**

Соснина С.Ф., Окатенко П.В., Юркин А.М., Рогачева С.А.,
Груздева Е.А., Сокольников М.Э.
**Лейкомогенный риск и темп накопления радиационной
дозы. Сообщение 1: Характеристика исследуемой группы
работников производственного объединения «МАЯК»... 18**
Шлеенкова Е.Н., Голиков В.Ю., Кайдановский Г.Н., Бажин С.Ю.,
Ильин В.А.

**Результаты контроля доз облучения хрусталиков глаз
у медицинского персонала г. Санкт-Петербурга29**

Рамзаев В.П., Барковский А.Н.
**Корреляция между расчетными и измеренными
значениями мощности дозы гамма-излучения в воздухе
в лесах, загрязненных ¹³⁷Cs: отдаленный период
после Чернобыльской аварии37**

Кононенко Д.В.
**Использование метода бета-подстановки
для анализа цензурированных данных об объемной
активности радона в воздухе помещений47**

ОБЗОРЫ

Ярмошенко И.В., Малиновский Г.П., Онищенко А.Д., Васильев А.В.
**Проблема облучения радоном в зданиях повышенного
класса энергоэффективности56**

САНИТАРНО-ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИЙ НАДЗОР

Чубирко М.И., Клепиков О.В., Куропат С.А., Кузмичев М.К.,
Студеникина Е.М.
**Оценка мощности эквивалентной дозы гамма-излучения
на открытой местности территории города Воронежа66**

МНЕНИЕ ЭКСПЕРТА

Архангельская Г.В., Зеленцова С.А.
**Пути оптимизации риск-коммуникации специалистов
по радиационной безопасности и населения:
рекомендации по языку общения72**

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Хакимова Н.У., Малышева Е.Ю., Шосафарова Ш.Г., Мирсаидов У.М.
**Сравнительный анализ внешнего облучения различных
профессиональных групп медперсонала г. Душанбе
Республики Таджикистан78**

Варфоломеева К.В.
**Кулинарная обработка сушеных грибов как эффективный
способ снижения содержания в них цезия-13782**
Сарычева С.С.

**Измерение поглощенной дозы в коже пациентов,
подвергающихся интервенционным исследованиям,
с помощью радиоохромных пленок Gafchromic XR-RV389**

ЕСКИД И РАДИАЦИОННО- ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ПАСПОРТИЗАЦИЯ

Барковский А.Н., Братилова А.А., Кормановская Т.А.,
Ахматдинов Руслан Р., Ахматдинов Рустам Р.
**Динамика доз облучения населения Российской
Федерации за период с 2003 по 2018 г.96**

ПЕРЕЧЕНЬ СТАТЕЙ ЗА 2019 ГОД123

**ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА
«РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА»128**

CONTENTS

Vol. 12 № 4, 2019

RESEARCH ARTICLES

Vlasov O.K., Krajewski P., Zvonova I.A., Malatova I., Bartuskova M.,
Schukina N.V., Chekin S.Yu., Tumanov K.A.
**Verification of radioecological models to the instrumental
data of the specific activity ¹³¹I in a grass in Mazovia
and Bohemia after the Chernobyl accident (from “Prague”
and “Warsaw” scenarios of the IAEA project EMRAS).....16**

Sosnina S.F., Okatenko P.V., Yurkin A.M., Rogacheva S.A., Gruzdeva E.A.,
Sokolnikov M.E.
**Leukemia risk and the pattern of dose accumulation.
Part 1: Characteristics of the study group of the Mayak
Production Association personnel26**

Shleenkova E.N., Golikov V.Yu., Kaidanovsky G.N., Bazhin S.Yu.,
Ilyin V.A.
**Results of eye lens doses control of medical personnel
in St. Petersburg35**

Ramzaev V.P., Barkovsky A.N.
**Correlation between calculated and measured values
of gamma dose rate in air in forests contaminated
with ¹³⁷Cs: the remote period after the Chernobyl accident45**

Kononenko D.V.
**Application of the β -substitution method for analyzing
censored data on indoor radon concentrations54**

REVIEW

Yarmoshenko I.V., Malinovsky G.P., Onishchenko A.D., Vasilyev A.V.
**Problem of radon exposure in energy-efficient buildings:
a review64**

SANITARY AND EPIDEMIOLOGICAL SURVEILLANCE

Chubirko M.I., Klepikov O.V., Kurolop S.A., Kuzmichev M.K.,
Studenikina E.M.
**Estimation of the equivalent dose rate of gamma radiation
in the open territory of the city of Voronezh70**

EXPERT OPINION

Arkhangelskaya G.V., Zelentsova S.A.
**Ways to optimize the risk communication between
specialists on radiation safety and population:
recommendations on communication language76**

BRIEF MESSAGES

Khakimova N.U., Malysheva E.Yu., Shosafarova Sh.G., Mirsaidov U.M.
**Comparative analysis of the external exposure of different
professional groups of medical staff of Dushanbe city
of the Republic of Tajikistan80**

Varfolomeeva K.V.
**Cooking of the dried mushrooms as an effective solution
for the reduction of the ¹³⁷Cs concentration87**
Sarycheva S.S.
**Patients skin dose measurements during interventional
radiological examinations using Gafchromic
XR-RV3 FILM94**

ISDCR AND RUSSIAN FEDERATION RADIATION-HYGIENIC PASSPORTIZATION

Barkovsky A.N., Bratilova A.A., Kormanovskaya T.A.,
Akhmatdinov Ruslan R., Akhmatdinov Rustam R.
**Trends in the doses of the population
of the Russian Federation in 2003–2018104**

LIST OF ARTICLES FOR 2019123

**JOURNAL OF RADIATION HYGIENE –
INSTRUCTIONS FOR AUTHORS128**

Верификация радиозэкологической модели на инструментальных данных удельной активности ^{131}I в траве в Мазовии и Богемии после аварии на ЧАЭС (по материалам «Пражского» и «Варшавского» сценариев проекта МАГАТЭ EMRAS)

О.К. Власов¹, П. Краевский², И.А. Звонова³, И. Малатова⁴, М. Бартускова⁵, Н.В. Щукина¹, С.Ю. Чекин¹, К.А. Туманов¹

¹ Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба — филиал Научного медицинского исследовательского центра радиологии Минздрава России, Обнинск, Россия

² Центральная лаборатория радиологической защиты, Варшава, Польша

³ 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

⁴ Национальный институт радиационной защиты, Прага, Чехия

⁵ Филиал Национального института радиационной защиты, Острава, Чехия

Выполнен анализ инструментальных данных «Пражского» и «Варшавского» сценариев о динамике удельных активностей ^{131}I в траве. Проведена реконструкция динамики удельных активностей ^{131}I в траве в населенных пунктах с ее измерениями. Реконструкция выполнена по трем моделям: прямого расчета по входным данным сценариев, однородного и неоднородного радиоактивного облака. Фактические плотности выпадений ^{137}Cs в местах отбора травы в среднем больше плотностей выпадения, реконструированных по модели прямого расчета, в 2,9 раза для Праги и в 2 раза для Варшавы. Эффективные осадки за время основных выпадений в местах отбора проб травы, реконструированные по модели однородного облака, в 3–4 раза больше, чем на ближайших к ним метеостанциях. Выявлен реалистический сценарий входных данных, приводящий к оптимальному согласию расчетных и инструментальных данных. Модели прямого расчета и однородного облака дают практически совпадающие между собой результаты и приводят к лучшему согласию с инструментальными данными, чем модель неоднородного облака; расчетные и инструментальные данные показывают значимое уменьшение удельной активности ^{131}I в траве после окончания основных выпадений за счет ее смыва с поверхности травы сильными продолжительными осадками через 13 и 19 суток после аварии в Мазовии и через 30 и 35 суток в Богемии. Размахи среднегеометрических значений и стандартных среднегеометрических отклонений отношений расчет/инструментальные данные составляют 0,8–1,1 в Мазовии и 1,8–1,9 в Богемии. Регрессионные зависимости диаграмм рассеивания расчетные/инструментальные данные практически параллельны диагонали с угловым коэффициентом, равным 0,94 для однолетней и 0,86 для многолетней травы.

Ключевые слова: авария на ЧАЭС, радиозэкологическая модель, проект МАГАТЭ EMRAS, «Пражский» и «Варшавский» сценарии, верификация модели, удельные активности ^{131}I в траве, погодные условия, плотности выпадения ^{137}Cs , неопределенности модели.

Введение

Радиозэкологические модели разрабатываются, главным образом, для целей реконструкции радиологических последствий крупных радиационных аварий с выбросом радиоактивных продуктов в атмосферу и переноса их на большие расстояния, когда не хватает данных прямых измерений для оценки радиационного воздействия аварии на человека, а также для прогнозирования радиологических последствий по результатам первичного мониторин-

га радиационной обстановки на начальном этапе аварии [1–4]. Всплеск интереса к радиозэкологическим моделям возник после аварии на Чернобыльской АЭС. Материалом для их создания и средством их верификации являлись результаты измерений проб окружающей среды. В начале 2000-х гг. МАГАТЭ инициировало международный проект «Радиозэкологическое моделирование в интересах радиационной безопасности (Environmental Modelling for Radiation Safety – EMRAS)», в рамках которого было

Звонова Ирина Александровна

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

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

предложено провести международное сличение и верификацию моделей, предложенных разными странами, для оценки доз облучения населения за счет выпадений радионуклидов ^{137}Cs и ^{131}I после аварии на Чернобыльской АЭС [5–8]. Полной картины последовательных измерений транспорта радионуклидов по экологической цепочке не удалось выполнить ни в одном локальном месте ни в одной стране. Поэтому при создании и последующей верификации радиоэкологических моделей анализировались экспериментальные данные, полученные для отдельных элементов экологической цепочки в разных местностях и странах. В данной работе использовались результаты измерений проб окружающей среды, представленные в рамках «Пражского» и «Варшавского» сценариев проекта МАГАТЭ EMRAS.

Одной из задач «Пражского» сценария было проведение исследований эффективности применения специальных методов ведения сельского хозяйства, методов подготовки кормов для молочного скота с целью уменьшения активности ^{131}I в молоке и тем самым снижения доз внутреннего облучения щитовидной железы населения. В «Варшавском» сценарии ставилась основная задача оценить эффективность йодной профилактики жителей, проведенной в Польше.

В отличие от целей сценариев EMRAS, авторами планируется проведение исследований транспорта наиболее значимых радионуклидов ^{137}Cs и ^{131}I по трофической цепочке: атмосфера – почва – растительность – организм сельскохозяйственных животных – молоко – человек с целью оценки доз внутреннего облучения щитовидной железы и всего тела жителей после аварии на ЧАЭС. Решение этой задачи распадается на ряд этапов, каждый из которых является темой отдельной статьи.

Отличительной особенностью баз данных «Пражского» и «Варшавского» сценариев является то, что измерения разных параметров проводились в разных местах: координаты метеостанций (данные об осадках и температурах), мест отбора проб воздуха, растительности, молока, как правило, не совпадали друг с другом. Поэтому для проведения радиоэкологических исследований с использованием имитационной модели сначала нужно было выполнить работу по созданию баз полного комплекта взаимно согласованных входных данных: динамики удельных объемных активностей и форм существования радионуклидов ^{137}Cs и ^{131}I в атмосфере, осадков в период выпадений и плотностей выпадения ^{137}Cs в населенных пунктах (НП).

Эти исследования были выполнены в первой работе данной серии [9]. В ней приводятся результаты создания такой базы радиоэкологических данных. Были рассмотрены две гипотезы формирования радиоактивного загрязнения местности: 1) пространственно однородное радиоактивное облако с неоднородными осадками в НП данного региона («мокрые» выпадения), включая нулевые осадки («сухие» выпадения); 2) неоднородное облако с одинаковыми осадками во всех НП данного региона.

В настоящей работе продолжается исследование этих двух гипотез на основе инструментальных данных о загрязнении растительности, представленных в «Пражском» и «Варшавском» сценариях проекта МАГАТЭ EMRAS.

Цель исследования – проведение верификации радиоэкологической модели на основе инструментальных данных динамики активностей ^{131}I в травяной растительности с выявлением правдоподобных и реалистических сценариев, приводящих к оптимальному согласию расчетных и инструментальных данных; оценка неопределенностей радиоэкологической модели на этапе реконструкции динамики активностей ^{131}I в травяной растительности для последующего их использования в исследованиях загрязнения зеленого корма и молока молочных коров.

Материалы и методы

Исследование динамики процессов загрязнения травяной растительности после аварии на ЧАЭС в Мазовии и Богемии проводится с использованием агроэкологического блока имитационной радиоэкологической модели [10]. Блок представляет собой систему линейных дифференциальных уравнений, описывающих динамику выпадений радионуклидов ^{131}I и ^{137}Cs из атмосферы на землю и растительность, динамику удельных активностей травяной, дикорастущей и культурной растительности кормовых и продовольственных сельскохозяйственных культур с учетом роста их биомасс. Динамика биомасс рассчитывается по данным о погодных условиях в год аварии. Входная информация модели состоит из следующего набора динамических параметров: удельные объемные активности и формы нахождения радионуклидов в атмосфере, среднесуточные температуры воздуха с начала вегетационного периода, осадки в период и после радиоактивных выпадений, урожайность сельскохозяйственных культур в год аварии. Набор этих данных вместе с данными о плотностях выпадения ^{137}Cs в НП представлены в большей или меньшей степени в сценариях проекта EMRAS [5–7].

Реконструкция удельных активностей ^{131}I в траве проводилась по трем моделям расчетов:

Модель 1 – прямой расчет: инструментальные данные о динамике удельных объемных активностей ^{131}I и ^{137}Cs в атмосфере и метеоданные об осадках на метеостанциях, ближайших к НП, где проводился отбор проб травы.

Модель 2 – неоднородное облако с одинаковыми осадками во всех НП региона: инструментальные данные о динамике удельных объемных активностей ^{131}I и ^{137}Cs в атмосфере в период основных выпадений для региона в целом пересчитывались к данным над НП с коэффициентом Kq_{cloud} по соотношению (1):

$$Q_{m2}^{Cs,I}(t) = Q_{instr}^{Cs,I}(t) * Kq_{cloud}; \theta_0 \leq t \leq \theta_1, (1)$$

где Q_{instr} и Q_{m2} – инструментальные данные удельных объемных активностей ^{137}Cs и ^{131}I соответственно в атмосфере в период основных выпадений (рис. 1); θ_0 и θ_1 – даты начала и окончания выпадения осадков ($\theta_0 \leq t \leq \theta_1$) для региона в целом и пересчитанные для НП, Бк/м³:

$$Kq_{cloud} = \frac{\sigma_{rec}}{\sigma_{dep}}. (2)$$

Здесь σ_{dep} и σ_{rec} – измеренные и рассчитанные по модели 1 прямого расчета плотности выпадения ^{137}Cs в НП (рис. 2), Бк/м².

Модель 3 – однородное облако: инструментальные данные о динамике удельных объемных активностей ^{137}Cs в атмосфере и расчетные эффективные осадки за пери-

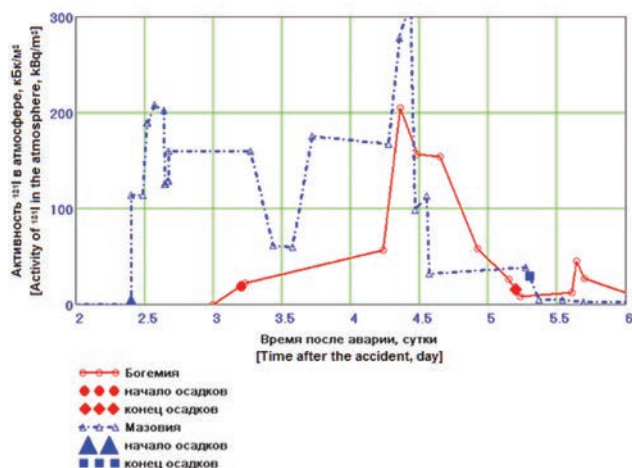


Рис. 1. Динамика удельных активностей ^{131}I в атмосфере Мазовии и Богемии и принятые для расчетов времена начала θ_0 и окончания θ_1 осадков

[Fig. 1. Dynamics of the specific activity of ^{131}I in the atmosphere of Mazovia and Bohemia and times of beginning and end of precipitation accepted for calculations]



• – $R_{\text{met}}(0,8 \text{ mm}) \rightarrow \sigma_{\text{rec}}(1,7 \text{ kBq/m}^2)$; ▲ – $\sigma_{\text{dep}}(3,4 \text{ kBq/m}^2) \rightarrow R_{\text{rec}}(3 \text{ mm})$

Рис. 2. Зависимости плотностей выпадения ^{137}Cs от осадков за период основных выпадений с примерами расчетов для метеостанции Warszawa Obserw. Astr в Варшаве.

Locality – населенный пункт, место в г. Варшава;
Meteo_station – ближайшая к населенному пункту метеостанция;
 R_{met} и R_{rec} – осадки по метеоданным и реконструированные по модели однородного облака

[Fig. 2. Dependences of on rains for the period of major precipitation with examples of calculations for the weather station Warszawa Obserw. Astr.

Locality – locality (place in the city); Meteo_station – the nearest weather station to this locality; R_{met} and R_{rec} – rain at meteodata and reconstructed model of a homogeneous cloud]

од основных выпадений, реконструированные по плотностям выпадений ^{137}Cs в НП и расчетным зависимостям плотностей выпадения ^{137}Cs от осадков (см. рис. 2).

Результаты и обсуждение

В «Пражском» сценарии инструментальные данные о динамике удельных активностей ^{131}I в траве приведены для населенного пункта Praha – Vinohrady с плотностью выпадения ^{137}Cs 7 kBq/m² и эффективными осадками за период основных выпадений, реконструированными по модели однородного облака, – неоднородные осадки, равные 6,3 мм. За этот же период времени на метео-

станции Praha – Karlov, ближайшей к этому НП и расположенной на расстоянии от него в 3,8 км, выпало, по метеоданным, 2,1 мм осадков. Измерения активности травы проводились в период с 14-х по 53-е сутки после аварии на ЧАЭС. Кроме того, в «Пражском» сценарии представлены данные измерений удельных активностей ^{131}I в траве для г. Братислава в Словакии. Измерения проводились с 5-х по 20-е сутки после аварии. Интересно отметить, что эти данные, несмотря на большую удаленность Праги от Братиславы, образуют одну и ту же временную зависимость и взаимно дополняют друг друга (рис. 3). Этот факт был использован в работе [9] при обосновании предпо-

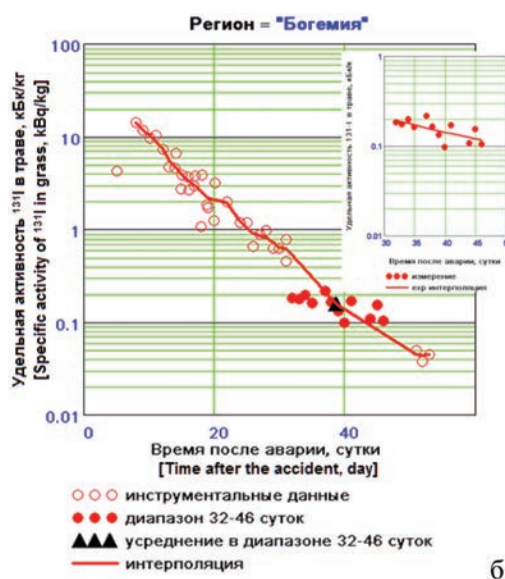
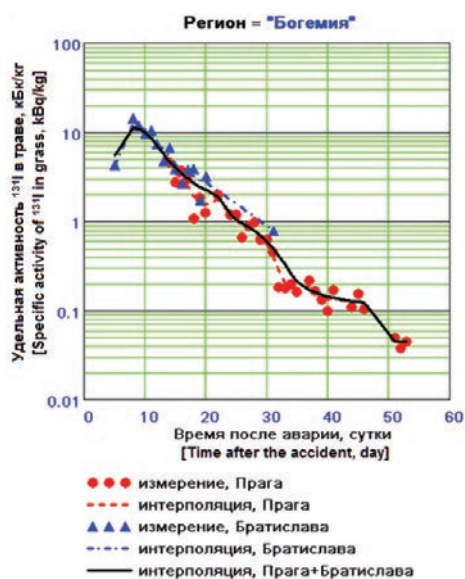


Рис. 3. Динамика удельной активности ^{131}I в траве: а) в Праге и Братиславе; б) объединенные инструментальные данные для Богемии

[Fig. 3. The dynamics of specific activity of ^{131}I in grass: а) in Praha and Bratislava б) – united instrumental data for Bohemia]

чительности использования модели однородного облака. Отметим также, что скорость экспоненциального уменьшения объединенных инструментальных данных для региона Богемии на временном участке от 32 до 46 суток после аварии, равная $0,04 \text{ сут}^{-1}$ (вставка на рисунке 3б), оказалась меньше скорости распада ^{131}I , равной $0,086 \text{ сут}^{-1}$. С учетом этого, при дальнейшей статистической обработке инструментальных данных использовалось их усредненное значение в диапазоне 32–46 суток, отмеченное на рисунке 3б треугольником.

В «Варшавском» сценарии (регион Мазовия) данные измерений удельной активности ^{131}I в траве были приведены для образцов травы, отобранных в Варшаве на метеостанции Warszawa Obserw. Astr. с плотностью выпадения ^{137}Cs $3,3 \text{ кБк/м}^2$. По данным этой метеостанции, здесь за период основных выпадений выпало $0,8 \text{ мм}$ осадков.

Отметим, что скорость экспоненциального уменьшения инструментальных данных в Мазовии оказалась в 3 раза больше, чем в Богемии (рис. 4).

Выполненный для Мазовии тестовый расчет с фактической скоростью самоочищения травы $0,34 \text{ сут}^{-1}$ (рис. 5) показал вполне удовлетворительное согласие расчетных и инструментальных данных как по средней величине от-

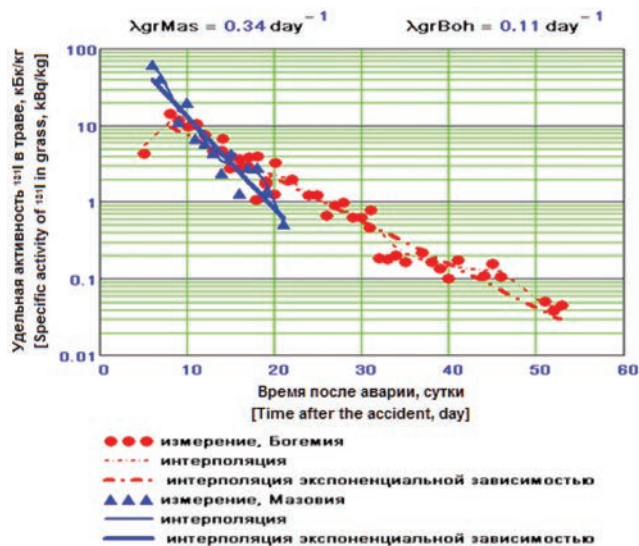


Рис. 4. Динамика удельной активности ^{131}I в траве Мазовии и Богемии.

λ_{grMas} и λ_{grBoh} – скорости экспоненциального уменьшения удельной активности ^{131}I в траве Мазовии и Богемии
[Fig. 4. The dynamics of specific activity of ^{131}I in grass in Masovia and Bohemia]

λ_{grMas} and λ_{grBoh} – rates of exponential decrease of specific activity ^{131}I in grass of Masovia and Bohemia]

ношения расчет/измерение (μ_i , i – модели расчета), так и по близости углов наклона прямых к диагонали регрессии на диаграмме их рассеивания β_1 (рис. 5).

Динамика реконструированных удельных активностей ^{131}I в свежей траве в Богемии и Мазовии для всех 3 моделей расчета, данные об осадках на ближайших метеостанциях, удельной объемной активности ^{131}I в атмосфере и плотности сырой биомассы травы представлены на рисунке 6.

Расчетные радиоэкологические данные для мест измерения травы вместе со статистическими параметрами отношения расчетных к инструментальным данным представлены в таблице.

Гистограмма распределения отношения расчетных данных к инструментальным данным удельной активности ^{131}I в траве Богемии для модели прямого расчета представлена на рисунке 7.

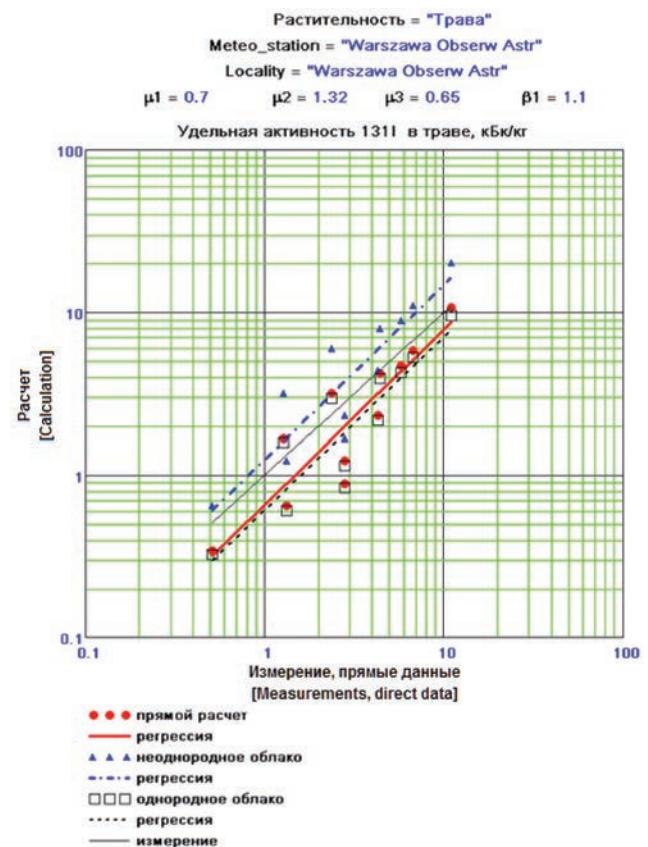


Рис. 5. Диаграммы рассеивания, скорректированные расчетные – инструментальные данные удельных активностей ^{131}I в траве Мазовии

[Fig. 5. The scatterplots adjusted the estimated and instrumental data ^{131}I specific activities in the grass in Mazovia]

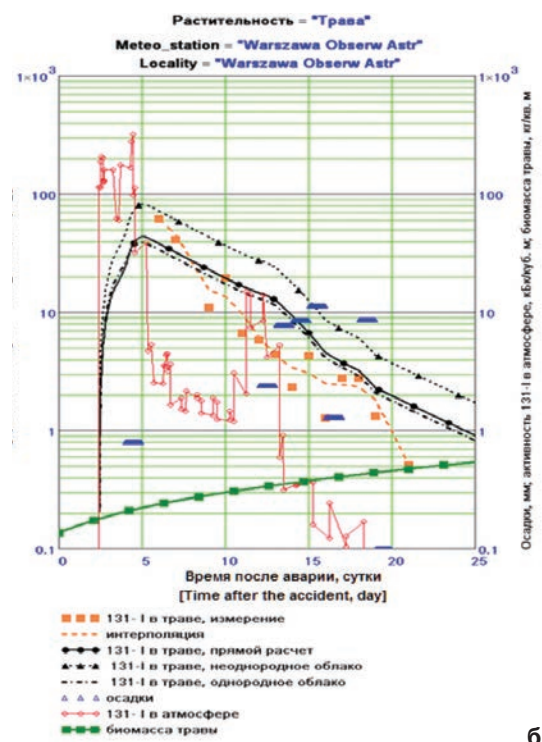
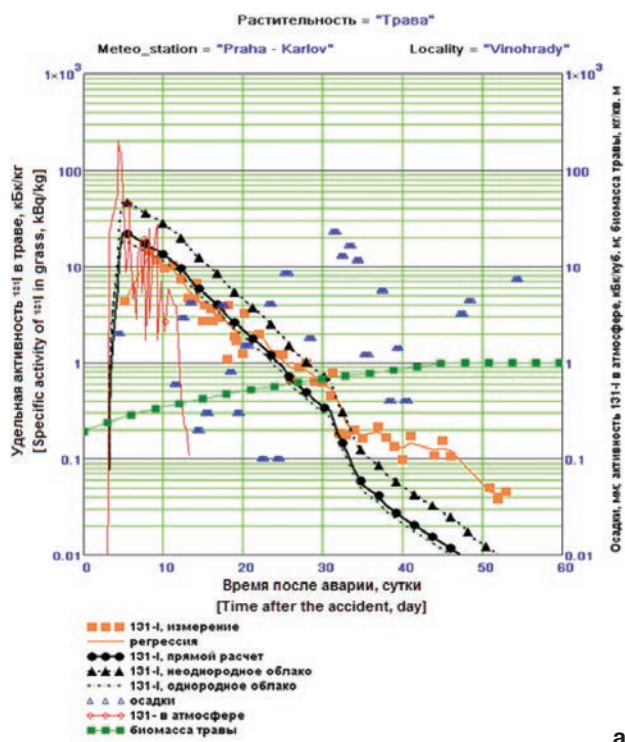


Рис. 6. Динамика удельной активности ^{131}I в свежей траве, удельной объемной активности ^{131}I в атмосфере, осадков и плотности сырой биомассы травы в Богемии (а) и Мазовии (б)
[Fig. 6. Dynamics of ^{131}I specific activity in wet grass, ^{131}I specific volume activity in the atmosphere, rains and wet grass biomass of Bohemia (a) and Mazovia (b)]

Радиоэкологические данные для мест измерения травы и статистические параметры отношения
расчетных к инструментальным данным

Таблица

[Table

Radioecological data for the measurement of grass and statistical parameters of the ratio of calculated to instrumental data]

Регион [Region]	Мазовия [Mazovia]	Богемия [Bohemia]
Метеостанция [Meteorological station]	Warszawa Obserw Astr	Praha – Karlov
Населенный пункт [Settlement]	Warszawa Obserw Astr	Vinohrady
Коэффициент пересчета удельных активностей ^{131}I в модели неоднородного облака $K_{q_{cloud}}$ [Conversion factor of ^{131}I specific activity in models of inhomogeneous clouds]	1,89	2,1
Плотность выпадения ^{137}Cs , kBq/m^2 [^{137}Cs fallout density, kBq/m^2]		
Фактическая [Actual]	3,26	6,97
Прямой расчет [Direct calculation]	1,73	3,32
Неоднородное облако [Heterogeneous cloud]	3,26	6,97
Однородное облако [Homogeneous cloud]	3,35	7,11
Осадки за период основных выпадений, мм [A rain during the period of main fallout, mm]		
Данные ближайшей к НП метеостанции [Data of the nearest weather station to this locality]	0,8	2,05
Эффективные в НП [Effective in the settlement]	3	6,17
Среднегеометрическое значение отношения данных (расчет/измерение) [A geometric mean value of the ratio data (calculation/measurement)]		
Прямой расчет [Direct calculation]	1,09	1,79
Неоднородное облако [Heterogeneous cloud]	4,72	9,47

Окончание таблицы

Регион [Region]	Мазовия [Mazovia]	Богемия [Bohemia]
Однородное облако [Homogeneous cloud]	1,17	1,61
Стандартное отклонение [Standard deviation]	1,67	1,76
Скорость экспоненциального уменьшения удельной активности ^{131}I в траве*, сутки $^{-1}$ [Rate of exponential reduction of grass activity*, day $^{-1}$]		
Измеренные данные [Measured data]	0,22	0,39
Расчетные данные [Calculated data]	0,18	0,16

* – в интервалах времени в период слабых осадков: 6–13 суток в Мазовии и 6–28 суток в Богемии.

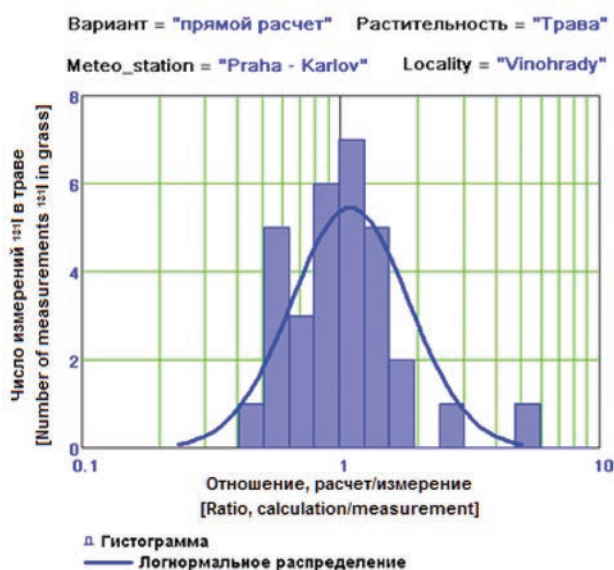


Рис. 7. Гистограмма распределения отношения расчетных данных к инструментальным данным Богемии для прямого расчета

[Fig. 7. Histogram of the distributions of the ratio calculated to the instrumental data of Bohemia for direct calculation]

Отметим следующие особенности данных в таблице и на рисунках 6, 7:

- плотности выпадений ^{137}Cs в НП отбора травы по модели прямого расчета в среднем меньше фактических в 2,1 раза для Праги и в 1,9 раз для Варшавы;
- в период основных выпадений на метеостанциях, ближайших к НП отбора травы, были осадки: 2,1 мм в Praha – Karlov в Богемии и 0,8 мм в Warsawa Observ Asrt в Мазовии;
- реконструированные эффективные осадки в НП с отборами проб травы в 3 раза больше выпавших осадков на ближайших к ним метеостанциях в Богемии и в 3,8 раза в Варшаве;
- максимальные значения измерений травы в Мазовии были больше, чем в Богемии;
- больше чем в 2 раза отклонения расчетных данных от инструментальных начинают появляться только после 32 суток после аварии для Богемии, для Мазовии – в интервале 10–15 суток и после 20 суток после аварии; в целом, согласие данных для Богемии существенно лучше, чем для Мазовии;

– в каждом регионе прямые расчеты и расчеты по модели однородного облака практически совпадают и приводят к лучшему согласию с измерениями, чем модель неоднородного облака;

– значения стандартных среднегеометрических отклонений распределения отношения расчетных данных к инструментальным лежат в диапазоне 1,6–1,7;

– расчетные и инструментальные данные показывают значимое уменьшение удельной активности ^{131}I в траве после окончания основных выпадений за счет ее смыва с поверхности травы сильными продолжительными осадками с 13-х по 19-е сутки после аварии в Мазовии и с 30-х по 35-е сутки в Богемии (рис. 8);

– при достаточно большом числе измерений, как в «Пражском» сценарии, распределение отношения реконструированных данных к инструментальным данным удельной активности ^{131}I в траве по числу измерений может быть аппроксимировано логнормальным законом (см. рис. 7); это свидетельствует о случайном характере временной вариабельности инструментальных данных относительно зависимости их средних значений от времени.

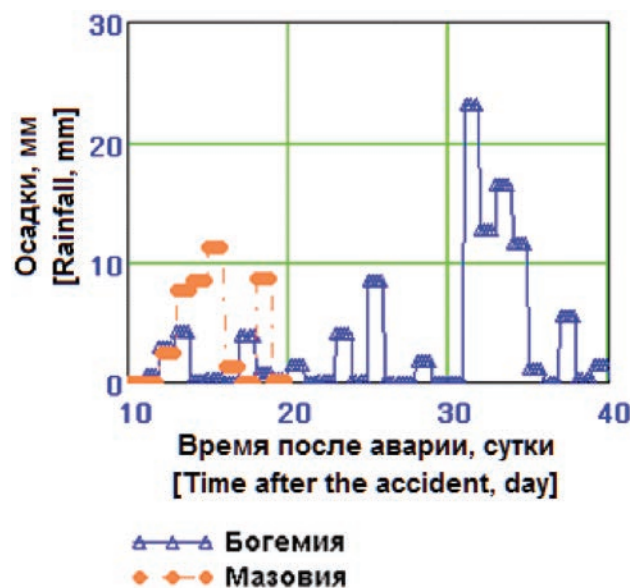


Рис. 8. Осадки в Богемии и Мазовии
[Fig. 8. Rain in Bohemia and Mazovia]

Наибольший интерес представляют данные о динамике инструментальных и расчетных данных. В периоды слабых осадков в Богемии до 31-х суток и в Мазовии до 13-х суток скорости уменьшения расчетных данных практически совпадают. В Богемии такая же степень согласия имеется между расчетными и инструментальными данными. В отличие от этого, в Мазовии динамика инструментальных и расчетных данных имеет существенные различия:

- скорость уменьшения инструментальных данных в интервале времени до 13 суток после аварии более чем в 2 раза больше скорости уменьшения расчетных данных, а в интервале времени от 13 до 19 суток с сильными осадками равна $0,09 \text{ сут}^{-1}$ и совпадает со скоростью распада ^{131}I ;
- расчетная скорость уменьшения активности ^{131}I в Варшаве в период времени от 13-х до 19-х суток после аварии увеличилась от средней $0,18 \text{ сут}^{-1}$ до $0,31 \text{ сут}^{-1}$ за счет интенсивных осадков 9–11 мм/сут.

Отмеченные особенности в динамике инструментальных и расчетных данных в Мазовии могут быть обусловлены спецификой травяного покрова в месте отбора проб травы на территории метеостанции в Мазовии.

Выявить это можно из анализа диаграмм рассеивания «расчет – измерение» на рисунке 9.

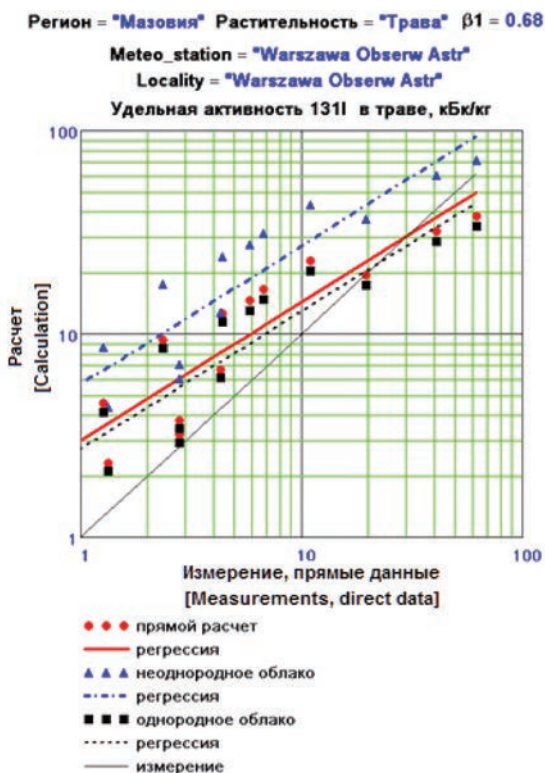
Данные диаграмм для Мазовии показывают, что значения расчетных данных и их регрессии наилучшим образом совпадают с данными измерений только в области их максимальных значений. В области меньших значений результаты расчета начинают становиться существенно больше инструментальных данных. Для модели прямого расчета и модели однородного облака это превышение

увеличивается с уменьшением инструментальных данных, достигая величин 2–4 раз. Такой вид расчетных зависимостей является отражением их более медленного уменьшения со временем, чем у инструментальных данных (см. рис. 3а).

Аналогичные диаграммы рассеивания для Богемии имеют существенно меньшее расхождение расчетных и инструментальных данных, особенно для модели однородного облака. Для этой модели имеется вполне удовлетворительное согласие не только по углу наклона, но также и по их абсолютным значениям средних значений отношения расчет/измерение.

Угловой коэффициент β в логарифмических зависимостях $Y = \alpha \cdot e^{\beta \cdot X}$, где X – измерение, Y – расчет, для модели однородного облака в Богемии равен 1,11 и меньше, чем в прямом расчете, равном 1,24. В идеальном случае величина β равна 1. Для Мазовии коэффициент β значительно больше отличается от 1 и равен для обеих моделей 0,68.

Возможной причиной такого различия инструментальных и расчетных данных в Мазовии могло стать то, что все выполненные расчеты для обоих регионов проводились для дикорастущей многолетней травы. Между тем измерения в Мазовии проводились на территории метеостанции для газонной травы, которая обычно периодически скашивается. Поэтому был проведен дополнительный расчет для культурной однолетней и многолетней газонной травы с учетом ее укосов при достижении плотности сырой биомассы травы $\sim 1 \text{ кг/м}^2$. После каждого укоса на газоне остается трава с плотностью биомассы $0,3 \text{ кг/м}^2$ с последующим нарастанием биомассы незагрязненной травы.



а



б

Рис. 9. Диаграммы рассеивания «расчетные – инструментальные данные» удельных активностей ^{131}I в траве: а) Мазовия и б) Богемия
 [Fig. 9. Scatterplots of estimated and instrumental data of specific activities of ^{131}I in the a) Mazovia grass b) in the Bohemia grass]

Инструментальные данные удельной активности ^{131}I в траве, расчетные данные для сеяной однолетней и многолетней травы вместе с данными об осадках, удельной активности ^{131}I в атмосфере и плотностей сырой биомассы этих типов трав с учетом их периодического скашивания приведены на рисунке 10.

Расчеты по моделям прямого расчета и однородного облака для многолетней газонной травы практически совпадают и показывают вполне удовлетворительное согласие с инструментальными данными как со всеми особенностями их динамики во всем временном интервале измерений, так и по величинам средних значений отношений расчетных данных к инструментальным. Среднегеометрическое значение и стандартное среднегеометрическое отклонение отношений расчет/измерение для многолетней газонной травы равны 1,1 и 1,8 соответственно. Модель неоднородного облака дает в 1,8 раза больше расчетные значения, чем модель прямого

расчета за счет коэффициента пересчета удельных активностей ^{131}I в атмосфере (см. табл., $K_{q_{\text{cloud}}}$), что и приводит к завышенным в 1,6 раза результатам расчетов по сравнению с инструментальными данными.

Напомним, что расчет, выполненный для дикорастущей травы по моделям прямого расчета и однородного облака, давал существенно большее расхождение со средним значением отношения расчет/измерения 1,84 (см. рис. 6 и 7). Приведенные на рисунке 10 данные для однолетней и многолетней газонной травы показывают, что в период времени больше 10 суток после аварии удельная активность многолетней травы становится больше, чем у однолетней за счет меньшей скорости прироста ее чистой биомассы.

Наиболее значимое улучшение согласия инструментальных и расчетных данных для газонной травы произошло в диаграммах их рассеивания (рис. 11), по сравнению с аналогичными данными для дикорастущей травы (см. рис. 9а).

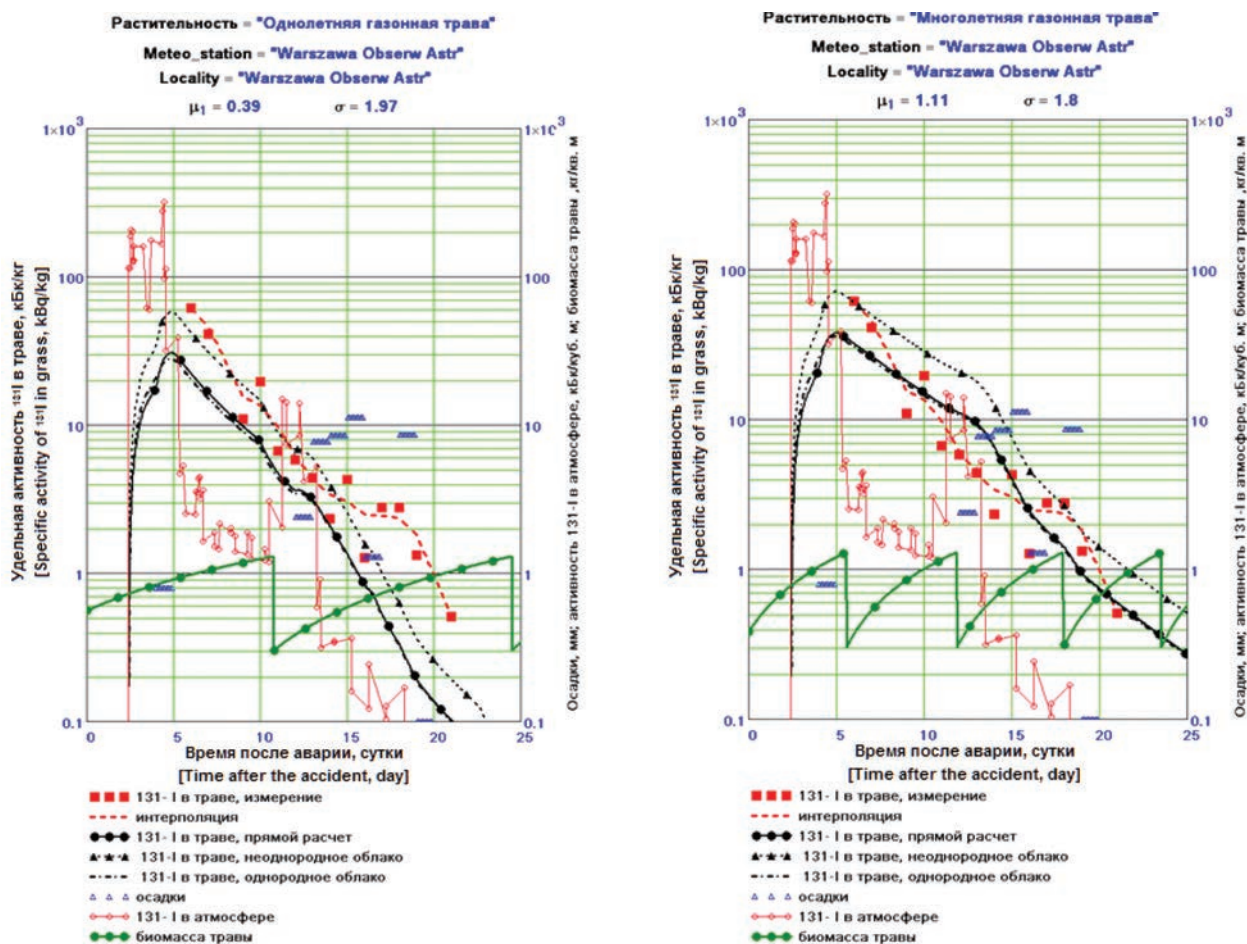


Рис. 10. Динамика удельной активности ^{131}I в газонной траве, осадках, плотности биомассы травы и удельных объемных активностей ^{131}I в атмосфере Мазовии

[Fig. 10. Dynamics of activity of specific activity of ^{131}I in lawn grass, precipitation, grass biomass density and specific volume activities of ^{131}I in the atmosphere of Mazovia]

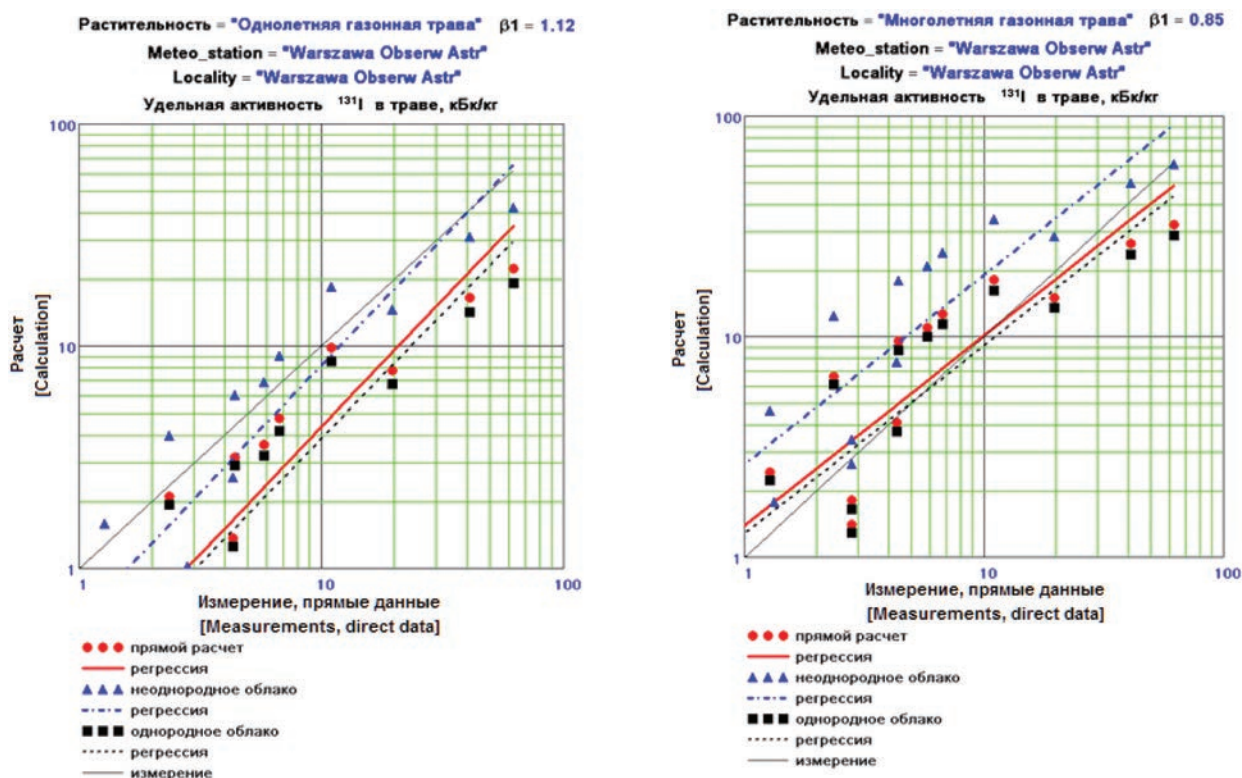


Рис. 11. Диаграммы рассеивания расчетных и инструментальных данных для газонной однолетней и многолетней травы
[Fig. 11. The scatter plots of calculated and measured data for annual and perennial lawn grass]

Регрессионные зависимости «расчетные – инструментальные данные», в отличие от данных на рисунке 9а, практически параллельны диагонали с коэффициентом β , равным 1,12 для однолетней и 0,85 для многолетней травы.

Вполне удовлетворительное согласие расчетных и инструментальных данных по всей совокупности полученных результатов является прямым подтверждением как корректности взаимосогласованной базы радиоэкологических данных, созданной в работе [9], так и возможностей корректного воспроизведения имитационной моделью основных процессов, определяющих динамику плотностей выпадения радионуклидов на местность и загрязнения растительности. Основные результаты анализа расчетных и инструментальных данных динамики удельных активностей ^{131}I в траве Мазовии и Богемии можно сформулировать следующим образом:

- скорости экспоненциального уменьшения инструментальных данных удельной активности ^{131}I в траве Мазовии и Богемии существенно различаются и равны 0,34 сут⁻¹ и 0,11 сут⁻¹ соответственно;
- фактические плотности выпадения ^{137}Cs в местах отбора проб травы в среднем больше плотностей выпадения, реконструированных по модели прямого расчета: в 2,9 раза – для Праги и в 2 раза – для Варшавы;
- эффективные осадки за время основных выпадений в местах отбора проб травы, реконструированные по модели однородного облака, в 3–4 раза больше, чем на ближайших к ним метеостанциях;
- расчетные данные удельной активности ^{131}I в траве по модели прямого расчета и по модели однородного облака практически совпадают и приводят к лучшему согла-

сию с инструментальными данными, чем по модели неоднородного облака;

- среднегеометрические значения отношений расчет/измерение для однолетней и многолетней газонной травы равны 0,38 и 1,11 соответственно со стандартными среднегеометрическими отклонениями, равными 1,97 и 1,8;

- регрессионные зависимости диаграмм рассеивания «расчетные – инструментальные данные» практически параллельны диагонали с коэффициентом β , равным 0,94 для однолетней и 0,86 для многолетней травы;

- расчетные и инструментальные данные показывают значимое уменьшение удельной активности ^{131}I в траве после окончания основных выпадений за счет их смыва с поверхности травы сильными продолжительными осадками через 13 и 19 суток после аварии в Мазовии и через 30 и 35 суток в Богемии.

Выводы

1. Проведена верификация радиоэкологической модели на инструментальных данных динамики активностей ^{131}I в травяной растительности Богемии и Мазовии с выявлением правдоподобных и реалистических сценариев, приводящих к оптимальному согласию расчетных и инструментальных данных.

2. Оценены неопределенности радиоэкологической модели на этапе реконструкции динамики активностей ^{131}I в травяной растительности для последующего их использования в исследованиях загрязнения зеленого корма и молока молочных коров.

3. Совокупность полученных результатов указывает на корректность имитационной модели при учете ос-

новых процессов, определяющих динамику выпадения радионуклидов на местность и загрязнения растительности в период выпадения и после окончания основных выпадений.

Литература

1. Testing of Environmental Transfer Models Using Data from the Atmospheric Release of Iodine-131 from the Hanford Site, USA, in 1963. – IAEA: Vienna, 2003.
2. Kruk, J.E., Pröhl, G., Kenigsberg, J.I. A radioecological model for thyroid dose reconstruction of the Belarus population following the Chernobyl accident. *Radiat. Environ. Biophys.*, 2004, V. 43, N 2, pp. 101–110.
3. Gering, F., Weiss, W., Wirth, E., Stapel, R., Jacob, P., Muller, H., Pröhl, G. Assessment and evaluation of the radiological situation in the late phase of a nuclear accident. *Radiat. Prot. Dosim.*, 2004, V. 109, N 1–2, pp. 25–29.
4. The RODOS system. Version PV6.0. Forschungszentrum Karlsruhe Institut für Kern- und Energietechn. Germany, 2005.
5. Environmental Modelling for Radiation Safety (EMRAS): a summary report of the results of the EMRAS programme (2003–2007). IAEA-TECDOC-1678. Vienna: IAEA, 2012, 60 p.
6. Krajewski, P., Ammann, M., Bartusková, M., Duffa, C., Filistovic, V., Homma, T., Kanyár, B., Malátová, I., Nedveckaite, T., Simon, S., Vlasov, O., Webbe-Wood, D., Zvonova, I. Validation of environmental transfer models and assessment of the effectiveness of countermeasures using data on ¹³¹I releases from Chernobyl. *Appl. Radiat. Isot.*, 2008, V. 66, N 11, pp. 1730–1735.
7. Bartusková, M., Malátová, I., Berkovskyy, V., Krajewski, P., Ammann, M., Filistovic, V., Homma, T., Horyna, J., Kanyár, B., Nedveckaite, T., Vlasov, O., Zvonova, I. Radioecological assessments of the Iodine working group of IAEA's EMRAS programme: Presentation of input data and analysis of results of the Prague scenario. *Radioprotection*, 2009, V. 44, N 5, pp. 295–299.
8. Zvonova, I., Krajewski, P., Berkovsky, V., Ammann, M., Duffa, C., Filistovic, V., Homma, T., Kanyar, B., Nedveckaite, T., Simon, S.L., Vlasov, O., Webbe-Wood, D. Validation of ¹³¹I ecological transfer models and thyroid dose assessments using Chernobyl fallout data from the Plavsk district, Russia. *J. Environ. Radioact.*, 2010, V. 101, N 1, pp. 8–15.
9. Власов, О.К. Создание и верификация взаимосогласованной базы входной информации имитационной модели транспорта радионуклидов ¹³⁷Cs и ¹³¹I по пищевой цепочке на инструментальных радио-экологических данных (по материалам «Пражского» и «Варшавского» сценариев проекта МАГАТЭ EMRAS) / О.К. Власов, П. Краевский, М. Бартускова, И. Малатова, Н.В. Щукина, С.Ю. Чекин, К.А. Туманов, И.А. Звонова // Радиация и риск. – 2019. – Т. 28, № 3. – С. 5–23.
10. Власов, О.К. Радиоэкологическая модель транспорта радионуклидов йода и цезия по пищевым цепочкам после радиационных аварий с выбросом в атмосферу для исследований закономерностей формирования доз внутреннего облучения населения. Часть 1. описание, постановка и свойства агроклиматического блока / О.К. Власов // Радиация и риск. – 2013. – Т. 22, № 2. – С. 16–34.

Поступила: 04.09.2019 г.

Власов Олег Константинович – заведующий лабораторией радиационно-экологической информатики, доктор технических наук, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал федерального государственного бюджетного учреждения «Научный медицинский исследовательский центр радиологии» Минздрава России, Обнинск, Россия

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

Звонова Ирина Александровна – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: iz_zv@bk.ru

Малатова Ирена – старший научный сотрудник, кандидат физических наук, Национальный институт радиационной защиты, Прага, Чехия

Бартускова Милусе – заведующая лабораторией, доктор философии, филиал Национального института радиационной защиты, Острава, Чехия

Щукина Наталия Владиленовна – старший научный сотрудник лаборатории радиационно-экологической информатики, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал федерального государственного бюджетного учреждения «Научный медицинский исследовательский центр радиологии» Минздрава России, Обнинск, Россия

Чекин Сергей Юрьевич – заведующий лабораторией оптимизации радиологической защиты, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал федерального государственного бюджетного учреждения «Научный медицинский исследовательский центр радиологии» Минздрава России, Обнинск, Россия

Туманов Константин Александрович – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией научно-методического сопровождения радиологических регистров и банков данных, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал федерального государственного бюджетного учреждения «Научный медицинский исследовательский центр радиологии» Минздрава России, Обнинск, Россия

Для цитирования: Власов О.К., Краевский П., Звонова И.А., Малатова И., Бартускова М., Щукина Н.В., Чекин С.Ю., Туманов К.А. Верификация радиоэкологической модели на инструментальных данных удельной активности ¹³¹I в траве в Мазовии и Богемии после аварии на ЧАЭС (по материалам «Пражского» и «Варшавского» сценариев проекта МАГАТЭ EMRAS) // Радиационная гигиена. – 2019. – Т. 12, № 4. – С. 6-17. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-6-17

Verification of radioecological models to the instrumental data of the specific activity ^{131}I in a grass in Mazovia and Bohemia after the Chernobyl accident (from “Prague” and “Warsaw” scenarios of the IAEA project EMRAS)

Oleg K. Vlasov¹, Pavel Krajewski², Irina A. Zvonova³, Irena Malatova⁴, Miluse Bartuskova⁵, Nataliya V. Schukina¹, Sergey Yu. Chekin¹, Konstantin A. Tumanov¹

¹ A. Tsyb Medical Radiation Research Center, Obninsk, Russia

² Central Laboratory for Radiological Protection), Warsaw, Poland

³ 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

⁴ National Radiation Protection Institute, Prague, Czech Republic

⁵ Branch of National Radiation Protection Institute, Ostrava, Czech Republic

The analysis of instrumental data of “Prague” and “Warsaw” scenarios on the dynamics of ^{131}I specific activities in the grass is carried out. Reconstruction of the ^{131}I the specific activities dynamics in the grass in the Mazovia and Bohemia localities is performed in three models: direct calculation the input data of the “Prague” and “Warsaw” scenarios, homogeneous cloud, heterogeneous rain and heterogeneous cloud-homogeneous rain. The actual ^{137}Cs fallout densities in the grass sampling sites in average more than 2.9 times for Prague and 2 times for Warsaw. Effective rain during the main fallout at the grass sampling sites, reconstructed on the model of a homogeneous cloud is 3–4 times more than at the nearest weather stations during this time. A realistic scenario of the input data leading to the optimal agreement of the calculated and instrumental data is revealed. It is shown that direct calculations and the homogeneous cloud model give almost identical results and lead to a significantly better agreement with the instrumental data than the an inhomogeneous cloud model. The calculated and instrumental data show a significant decrease in the ^{131}I specific activity in the grass after the end of the main fallout due to its flushing from the grass surface by strong prolonged rain 13 and 19 days after the accident in Mazovia and 30 and 35 days in Bohemia. Uncertainties in the results of reconstruction of the dynamics of ^{131}I and ^{137}Cs activities in vegetation are estimated. The mean-geometric values and standard mean-geometric deviations of the calculation/ instrumental data ratios are: 0.8–1.1 and 1.8–1.9 for grass.

Key words: Chernobyl accident, radioecological model, IAEA project EMRAS, “Prague” and the Warsaw” scenarios, model verification, specific activity of ^{131}I in the grass, weather conditions, densities of ^{137}Cs deposition, estimates of the uncertainty of the model.

References

1. Testing of Environmental Transfer Models Using Data from the Atmospheric Release of Iodine-131 from the Hanford Site, USA, in 1963. IAEA, Vienna, 2003.
2. Kruk, J.E., Pröhl, G., Kenigsberg, J.I. A radioecological model for thyroid dose reconstruction of the Belarus population following the Chernobyl accident. *Radiat. Environ. Biophys.*, 2004, vol. 43, no. 2, pp. 101–110.
3. Gering, F., Weiss, W., Wirth, E., Stapel, R., Jacob, P., Muller, H., Pröhl, G. Assessment and evaluation of the radiological situation in the late phase of a nuclear accident. *Radiat. Prot. Dosim.*, 2004, vol. 109, no. 1–2, pp. 25–29.
4. The RODOS system. Version PV6.0. Forschungszentrum Karlsruhe Institut für Kern- und Energietechn. Germany, 2005.
5. Environmental Modelling for Radiation Safety (EMRAS): a summary report of the results of the EMRAS programme (2003–2007). IAEA-TECDOC-1678. Vienna, IAEA, 2012, 60 p.
6. Krajewski, P., Ammann, M., Bartusková, M., Duffa, C., Filistovic, V., Homma, T., Kanyár, B., Malátová, I., Nedveckaite, T., Simon, S., Vlasov, O., Webbe-Wood, D., Zvonova, I. Validation of environmental transfer models and assessment of the effectiveness of countermeasures using data on ^{131}I releases from Chernobyl. *Appl. Radiat. Isot.*, 2008, vol. 66, no. 11, pp. 1730–1735.
7. Bartusková, M., Malátová, I., Berkovskyy, V., Krajewski, P., Ammann, M., Filistovic, V., Homma, T., Horyna, J., Kanyár, B., Nedveckaite, T., Vlasov, O., Zvonova, I. Radioecological assessments of the Iodine working group of IAEA's EMRAS programme: Presentation of input data and analysis of results of the Prague scenario. *Radioprotection*, 2009, vol. 44, no. 5, pp. 295–299.
8. Zvonova, I., Krajewski, P., Berkovsky, V., Ammann, M., Duffa, C., Filistovic, V., Homma, T., Kanyár, B., Nedveckaite, T., Simon, S.L., Vlasov, O., Webbe-Wood, D. Validation of ^{131}I ecological transfer models and thyroid dose assessments using Chernobyl fallout data from the Plavsk district, Russia. *J. Environ. Radioact.*, 2010, vol. 101, no. 1, pp. 8–15.
9. Vlasov O.K., Krajewski P., Bartuskova M., Malatova I., Shchukina N.V., Chekin S.Yu., Tumanov K.A., Zvonova I.A. The creation and verification of a mutually agreed database of input information of the simulation model of transport of

Irina A. Zvonova

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

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

radionuclides ^{137}Cs and ^{131}I along the food chain on instrumental radioecological data (based on the materials of the "Prague" and "Warsaw" scenarios of the IAEA EMRAS project). Radiatsiya i risk = Radiation and Risk, 2019, vol. 28, no. 3, pp. 5–23. (In Russian)

10. Vlasov O.K. Radioecological model for transport of radioiodine and radiocesium in the food chains after radiological

accidents and discharge of radioactive substances to atmosphere for study of mechanism of formation of internal radiation doses to population. Part 1. Description, formulation and properties of agroclimatic model. Radiatsiya i risk = Radiation and Risk, 2013, vol. 22, no. 2, pp. 16–34. (In Russian)

Received: September 04, 2019

Oleg K. Vlasov – Head of the Laboratory of Radiation-environmental Informatics, Dr.Sci.Tech., A. Tsyb Medical Radiation Research Center, Obninsk, Russia

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

For correspondence: Irina A. Zvonova – Dr.Sci.Tech., Chief Researcher, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights and Human Well-Being (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: iz_zv@bk.ru)

Malatova Irena – Senior Researcher of National Radiation Protection Institute, Prague, Czech Republic

Bartuskova Miluse – Ph.D, Head of radiochemistry department National Radiation Protection Institute, Ostrava, Czech Republic

Nataliya V. Shchukina – Senior Researcher of the Laboratory of Radiation-Environmental Informatics, A. Tsyb Medical Radiation Research Center, Obninsk, Russia

Sergey Yu. Chekin – Head of the Laboratory of Optimization of Radiological Protection, A. Tsyb Medical Radiation Research Center, Obninsk, Russia

Konstantin A. Tumanov – Head of the Laboratory of Scientific-methodical Maintenance of Radiological Registers and Data Banks), C. Sc., Biol., A. Tsyb Medical Radiation Research Center, Obninsk, Russia

For citation: Vlasov O.K., Krajewski P., Zvonova I.A., Malatova I., Bartuskova M., Schukina N.V., Chekin S.Yu., Tumanov K.A. Verification of radioecological models to the instrumental data of the specific activity ^{131}I in a grass in Mazovia and Bohemia after the Chernobyl accident (from "Prague" and "Warsaw" scenarios of the IAEA project EMRAS Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene, 2019, Vol. 12, No. 4, pp. 6-17. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-6-17

Лейкомогенный риск и темп накопления радиационной дозы. Сообщение 1: Характеристика исследуемой группы работников производственного объединения «МАЯК»

С.Ф. Соснина, П.В. Окатенко, А.М. Юркин, С.А. Рогачева, Е.А. Груздева, М.Э. Сокольников

Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства России,
Озёрск, Россия

Представлены результаты разработки базы данных «Лейкозы в когорте персонала производственного объединения «Маяк» 1948–1958 гг. найма», созданной в лаборатории радиационной эпидемиологии Южно-Уральского института биофизики. База данных содержит гематологическую, клиническую и дозиметрическую информацию о работниках основных заводов первого промышленного объекта отечественной атомной отрасли, нанятых в период становления производства — 1948–1958 гг. В компьютерную базу данных вошли сведения о двух группах работников производственного объединения «Маяк»: основную группу работников, причиной смерти которых был лейкоз ($n=84$), и группу сравнения — персонал предприятия без онкогематологической патологии ($n=300$). Группа сравнения сформирована из расчета 3–4 контроля к каждому случаю лейкоза с сопоставлением по полу, возрасту начала облучения, накопленной дозе внешнего гамма-облучения на красный костный мозг. Описаны методика сбора данных и использованные источники медицинской информации. Дана характеристика специально созданного программного обеспечения. База данных, включающая в итоге 19 593 анализа крови, отражает динамику гематологических показателей персонала атомного комплекса в результате пролонгированного радиационного воздействия. Диапазон накопленных поглощенных доз внешнего гамма-облучения на красный костный мозг в группе персонала с диагностированными лейкозами составил 0,001–4,96 Гр со средней дозой среди мужчин — 1,24 Гр, среди женщин — 0,61 Гр. Группа персонала без исхода в виде лейкозов характеризовалась аналогичным диапазоном доз. Вместе с тем, наблюдались различия в темпе накопления внешних доз радиационного воздействия. Средний период радиационного воздействия на производстве в группе работников с онкогематологической патологией составил среди мужчин 14,3 года, среди женщин — 12,1 года; в группе сравнения — 20,4 и 13,9 лет соответственно. Наибольшее число диагностированных лейкозов отмечалось у персонала радиохимического производства (54,8%). В структуре лейкозов у работников преобладали миелолейкозы (47,6%), среди которых острые миелолейкозы составляли более половины; лимфолейкоз диагностирован в 14,3% случаев с превалированием хронических лимфолейкозов. Наиболее редкими формами злокачественных новообразований кроветворной ткани были острый и хронический моноцитарные лейкозы. Показана возможность соотнесения гематологических показателей с индивидуальными дозами внешнего гамма- и внутреннего альфа-облучения (инкорпорированным плутонием-239), распределенными по времени. База данных позволяет производить расчет интегральных лейкоцитарных индексов, отражающих реагирование системы кроветворения на радиационное воздействие, отслеживать изменения гемопоэза пропорционально накопленной дозе на красный костный мозг, анализировать особенности восстановления гематологических сдвигов после прекращения контакта персонала с ионизирующей радиацией. Наличие сведений об острых и хронических заболеваниях работников дает возможность исключить неспецифические реакции системы кроветворения, вызванные сопутствующей патологией. В качестве перспективного направления использования базы данных может рассматриваться пересмотр оценок лейкомогенного риска в зависимости от мощности дозы у персонала, подвергавшегося хроническому радиационному воздействию.

Ключевые слова: лейкомогенный риск, радиационное воздействие, персонал производственного объединения «Маяк», система кроветворения, база данных.

Введение

Ионизирующее излучение относится к вредным производственным факторам с гематотропным действием [1]. Являясь доказанным стохастическим радиационным

эффектом [2, 3], лейкоз остается значимой темой многочисленных исследований [4–8]. Существующие стандарты радиационной безопасности основаны на результатах наблюдений за людьми, которые подверглись острому облучению. Так, основным источником информации о за-

Соснина Светлана Фаридовна

Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства России

Адрес для переписки: 456780, Россия, Озёрск, Челябинская область, Озёрское шоссе, 19; E-mail: sosnina@subi.su

висимости доза – эффект для лейкозов являются данные о когорте лиц, подвергшихся острому облучению во время атомных бомбардировок Японии (когорта LSS) [5, 7]. Между тем экстраполяция эффектов острого облучения к эффектам хронического радиационного воздействия остается дискуссионной. Кроме того, признавая несомненную роль ионизирующей радиации как фактора канцеро- и лейкогенеза, исследователи не пришли к единому мнению о «минимальной радиационной нагрузке на костный мозг, вызывающей риск возникновения лейкозов» [9].

Одним из наиболее информативных ресурсов для проведения прямой оценки эффектов хронического радиационного воздействия на производстве, является когорта работников производственного объединения (ПО) «Маяк» – комплекса взаимосвязанных производств, где в 1948 г. был выведен на проектную мощность первый в стране и на Евроазиатском континенте уран-графитовый промышленный реактор. В настоящее время когорта персонала ПО «Маяк» насчитывает более 36 тысяч работников, подвергшихся пролонгированному радиационному воздействию с различными сценариями техногенного облучения.

Создание базы данных лейкозов в когорте персонала ПО «Маяк» как хранилища клинико-гематологической и дозиметрической информации открывает возможности для проведения ретроспективного эпидемиологического анализа радиогенного риска возникновения лейкозов с учетом темпов накопления дозы радиационного воздействия на красный костный мозг и выявления особенностей гемопоэза при хроническом облучении в производственных условиях.

Цель исследования – создание компьютерной базы гематологических данных работников ПО «Маяк» 1948–1958 гг. найма с установленным исходом в виде лейкоза.

Материалы и методы

При создании базы данных «Лейкозы в когорте персонала производственного объединения «Маяк» 1948–1958 гг. найма» (далее – БД) использованы следующие источники информации из имеющегося научно-технического задела лаборатории эпидемиологии Южно-Уральского института биофизики:

1. Когорта персонала ПО «Маяк» [10] 1948–1982 гг. найма, насчитывающая 25 757 работников основных (реакторное, радиохимическое, плутониевое производства) и вспомогательных (водоподготовки, ремонтно-механический) заводов.

2. Архив медицинских карт персонала ПО «Маяк» и вспомогательных подразделений, включающий более 60 тысяч архивных документов и послуживший источником гематологических данных у работников.

Для подтверждения онкогематологической патологии у персонала ПО «Маяк» использовались следующие источники: контрольные карты диспансерного наблюдения больного злокачественным новообразованием (ЗНО) (форма № 030-6/у); статистические талоны для регистрации заключительных (уточненных) диагнозов; медицинские книжки персонала ПО «Маяк» (утвержденные Третьим Главным Управлением при Минздраве СССР); эпикризы стационарного лечения больного; выписки из

медицинской карты стационарного больного ЗНО (форма 027-1/у); медицинские свидетельства о смерти (форма №106/у-08); протоколы патологоанатомических и судебно-медицинских исследований; результаты исследования цитологических и гистологических материалов, в том числе пунктатов костного мозга, а также тканей лимфатических узлов, полученных посредством эксцизионной биопсии; справки ЗАГС о причинах смерти; сведения из иногородних лечебных учреждений, зафиксировавших смерть наблюдаемого работника ПО «Маяк» – мигранта.

В когорте работников ПО «Маяк» 1948–1982 гг. найма к настоящему времени всего зарегистрировано 109 случаев смерти от лейкозов, из них 88,1% (96 случаев) относятся к персоналу, нанятому в 1948–1958 гг., – первые десять лет работы предприятия. Этот период характеризовался наиболее высокими уровнями радиационного воздействия на персонал из-за основных пределов годовой дозы внешнего облучения для того времени, чрезвычайно высоких темпов развития технологического процесса и ввода в эксплуатацию новых производств, недостатка научных знаний и опыта в первые годы работы предприятия, несовершенства средств индивидуальной защиты.

В то же время высокие уровни облучения на производстве не всегда приводили к неблагоприятным исходам в виде злокачественных нарушений костномозгового кроветворения. В связи с этим в БД в настоящий момент вошли работники 1948–1958 гг. найма с сопоставимой суммарной дозой в результате профессионального контакта с источниками ионизирующего излучения, но разными последствиями для здоровья с целью анализа морфологических изменений периферической крови в зависимости от темпов накопления доз радиационного воздействия.

Из когорты персонала ПО «Маяк» сформированы две группы: группа «Случаи» – работники основных заводов 1948–1958 гг. найма с установленным исходом в виде лейкемии, и группа «Контроли» – работники без онкогематологической патологии. Для достижения максимальной однородности групп к каждому случаю произведен подбор 3–4 внутренних контролей, подвергшихся радиационному воздействию на производстве в той же суммарной дозе внешнего гамма-облучения на красный костный мозг ($\pm 5\%$), с учетом пола, возраста начала облучения (± 2 года).

Группа «Случаи» в итоге включала 84 работника ПО «Маяк» 1948–1958 гг. найма (64 мужчины и 20 женщин), так как 12 случаев лейкоза не вошли в созданную БД по следующим причинам: не являлись персоналом основных производств; отсутствие архивной амбулаторной карты; специфичность профмаршрута, не позволившего подобрать внутренний контроль; малочисленность клинических анализов крови; ограничение периода наблюдения до 31.12.2012 г. в связи с трудностями по уточнению персональных данных работников ПО «Маяк» – мигрантов. Группа «Контроли» состояла из 300 работников (230 мужчин и 70 женщин) ПО «Маяк».

Из амбулаторных карт обеих групп извлечены сведения о клинических анализах крови у каждого работника, перенесенных острых и хронических заболеваниях с указанием дат. Данные из медицинских карт предварительно выписывались в специально разработанную «Карту данных гемограмм», содержащую, помимо общих сведе-

ний на работника ПО «Маяк», клинико-гематологическую информацию.

Для ввода информации в БД создано специальное программное обеспечение с помощью среды разработки Microsoft Visual Studio 2013 (язык программирования Visual Basic.NET). В компьютерной базе данных сведения хранятся в виде таблиц; для хранения данных использована система управления базами данных Microsoft SQL Server 2008 R2. На рисунке приведен снимок одной из страниц созданной БД, отображающей интерфейс программы.

Базовой составляющей БД является блок из 19 593 клинических анализов периферической крови, записи которых структурированы по следующим разделам: эритроцитарные, мегакариоцитарные, гранулоцитарные и агранулоцитарные клеточные ростки. БД позволяет рассчитать абсолютное количество клеточных элементов крови, различные лейкоцитарные индексы, корреляционную зависимость параметров гемопоэза от дозы радиационного воздействия. Предусмотрена система обновления и пополнения БД.

Каждой гемограмме соответствует перенесенная на тот момент острая патология или обострение хронического заболевания, закодированные согласно Международной статистической классификации болез-

ней и проблем, связанных со здоровьем, Десятого пересмотра (МКБ-10) [11]. Предложенный в поисковике БД глоссарий МКБ-10 предполагает возможность выбора диагноза. Наличие в обеих исследуемых группах информации об интеркуррентной патологии и вредных привычках позволяет анализировать динамику гематологических показателей с учетом возможных мешающих факторов.

Индивидуальные накопленные дозы профессионального облучения персонала ПО «Маяк», включая информацию по измеренным дозам внешнего гамма- и внутреннего альфа-облучения (инкорпированным плутонием-239) на красный костный мозг получены из «Дозиметрической Системы Работников Маяка» [12]. Доступны индивидуальные суммарные годовые дозы и дозы за месяц. Информация о дозах хранится в отдельном файле формата HDF5 (Hierarchical Data Format).

Сравнение частот в исследовании проведено при помощи критерия χ^2 и точного критерия Фишера, различия считали достоверными при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Характеристика исследуемых групп в сравнении со всей когортой персонала основных заводов ПО «Маяк» 1948–1958 гг. найма представлена в таблице 1.

The screenshot displays a software interface for entering and calculating hematology data. It includes fields for patient information (Full name, Registry number, Birthdate, Medical record number), Date of analysis, and various hematology parameters (Hemoglobin, Erythrocytes, Proerythroblasts, Erythroblasts, Polychromatophil cell, Polychromatophilic erythroblasts, Fragmented erythrocytes, Blood color index, Reticulocytes, Hematocrit, Erythrocyte sedimentation rate, Thrombocytes, Megakaryoblasts, Promegakaryocytes, Megakaryocytes). The 'Leukocytes' section shows a total count of 4.2 x 10⁹/μL. The 'Leukogram' section shows percentages for various leukocyte types: Myeloblasts (0%), Promyelocytes (0%), Myelocytes (0%), Juvenile cells (Metamyelocytes) (0%), Stab neutrophils (8%), Segmented neutrophils (62.5%), Eosinophils (1.5%), Basophils (0%), Lymphocytes (18.5%), Lymphoblasts (0%), Prolymphocytes (0%), Monocytes (9.5%), Monoblasts (0%), Promonocytes (0%), and Plasmacytes (0%). The 'Leukocyte indices' section shows a Neutrophil/Lymphocyte ratio of 3.810811. The 'Diseases' section has a 'Save' button and a 'СОХРАНИТЬ' button.

Рис. Интерфейс программного обеспечения
[Fig. Software interface]

Характеристика исследуемых групп персонала ПО «Маяк»

Таблица 1

[Table 1]

Characteristics of the studied groups of Mayak PA workers]

Показатель [Indicator]	Когорта персонала 1948–1958 гг. найма (основ- ные заводы) Mayak Cohort employed in 1948–1958 (main plants)			Основная группа [Cases]			Контрольная группа [Controls]		
	Всего [Total]	Муж. [Male]	Жен. [Female]	Всего [Total]	Муж. [Male]	Жен. [Female]	Всего [Total]	Муж. [Male]	Жен. [Female]
Количество работников [Number of workers]	12305 (100%)	8729 (70,9%)	3576 (29,1%)	84 (100%)	64 (76,2%)	20 (23,8%)	300 (100%)	230 (76,7%)	70 (23,3%)
Тип производства [Type of production plant]									
Реакторное [Reactor]	3161 (25,7%)	2336 (18,9%)	825 (6,7%)	20 (23,8%)	13 (15,5%)	7 (8,3%)	77 (25,7%)	68 (22,7%)	9 (3%)
Радиохимическое [Radiochemical]	5583 (45,4%)	3986 (32,4%)	1597 (13%)	46 (54,8%)	41 (48,8%)	5 (6%)	173 (57,6%)	136 (45,3%)	37 (12,3%)
Плутониевое [Plutonium factory]	3561 (28,9%)	2407 (19,6%)	1154 (9,4%)	18 (21,4%)	10 (11,9%)	8 (9,5%)	50 (16,7%)	26 (8,7%)	24 (8%)
Профессиональные заболевания [Occupational diseases]									
Хроническая лучевая болезнь [Chronic radiation sickness]	2065 (16,8%)	1410 (11,5%)	655 (5,3%)	29 (34,5%)	25 (29,7%)	4 (4,8%)	80 (26,7%)	65 (21,7%)	15 (5%)
Острая лучевая болезнь [Acute radiation sickness]	43 (0,35%)	35 (0,28%)	8 (0,07%)	–	–	–	–	–	–
Пневмосклероз [Pneumosclerosis]	59 (0,48%)	37 (0,3%)	22 (0,18%)	–	–	–	4 (1,3%)	1 (0,3%)	3 (1%)

Когорта работников основных заводов ПО «Маяк», нанятых в первое десятилетие работы предприятия, в целом составляет 12 305 человек, 70,9% (8729 чел.) из которых – мужчины. Среди всех случаев лейкозов в основной группе 76,2% лейкозиев (64 чел.) диагностированы у мужчин. Несмотря на то, что сопоставление числа лейкозов у мужчин-работников с численностью мужчин во всей когорте статистически незначимо ($p>0,05$), следует отметить, что гендерные различия с преобладанием ЗНО кроветворной ткани с раннего возраста у лиц мужского пола согласуются с литературными данными и сведениями национальной и мировой статистики [13, 14]. Средний возраст найма работников на ПО «Маяк» в исследуемых группах составил $26,2\pm 0,8$ года с диапазоном 17–61 год.

Большинство лейкозов было зарегистрировано среди персонала радиохимического производства – 54,8% (46 случаев), что в сравнении с удельным весом этой категории работников в когорте не имело значимых статистических различий ($p>0,05$). Однако такое же сопоставление среди мужчин-работников радиохимического завода показало явное преобладание лейкозов ($p<0,01$) у персонала этого типа производства – 48,8% всех лейкозов (41 случай). Среди всего персонала реакторного и плутониевого производств отмечено практически одинаковое число лейкозиев – 20 (23,8%) и 18 (21,4%) соответственно.

Наиболее частым профессиональным заболеванием во всей когорте персонала ПО «Маяк» 1948–1958 гг. найма была хроническая лучевая болезнь, диагностированная у 16,8% (2065 случаев) работников. В группе персонала с установленным исходом в виде лейкоза число профбольных достигало 34,5% (29 чел.) с весомым преобладанием мужчин (25 чел.). Следует также отметить, что хроническая лучевая болезнь была выявлена у каждо-

го четвертого работника из группы «Контроли» (26,7% – 80 чел.). Острая лучевая болезнь, диагностированная у 43 работников во всей когорте, среди исследуемых групп не зарегистрирована. Все профессиональные заболевания, формирование которых относилось к первым годам работы ядерного комплекса, были обусловлены высокими дозами внешнего и внутреннего облучения персонала. Дозиметрическая характеристика групп, вошедших в БД, представлена в таблице 2.

Все работники в исследуемых группах подверглись внешнему гамма-облучению в широком диапазоне доз: от единиц мГр до нескольких Гр. Средняя накопленная доза внешнего гамма-облучения на красный костный мозг в группе персонала с лейкозиев составила среди мужчин 1,24 (0,02–4,96) Гр, среди женщин вполнину меньше – 0,61 (0,001–3,06) Гр. Так как внутренний контроль формировался по критерию одинаковой со случаем накопленной дозы внешнего гамма-облучения на красный костный мозг, средние дозы среди работников без онкогематологической патологии были аналогичными – 1,13 (0,02–5,29) у мужчин и 0,57 (0,001–2,93) у женщин.

Дозиметрическая характеристика исследуемых групп персонала ПО «Маяк»

Таблица 2

Dosimetric characteristics of the studied groups of Mayak PA workers]

Показатель [Indicator]	Группа «Случаи» [Cases]	Группа «Контроли» [Controls]
Всего [Total]:	84	300
Мужчины [Male]	64	230
Женщины [Female]	20	70

Окончаник таблицы 2

Показатель [Indicator]	Группа «Случаи» [Cases]	Группа «Контроли» [Controls]
Внешнее гамма-облучение [External gamma irradiation]		
Число работников, подвергшихся внешнему гамма-облучению [The number of workers exposed to gamma irradiation]	84 (100%)	300 (100%)
Средняя накопленная доза на красный костный мозг*, Гр [The average cumulative dose to red bone marrow, Gy]:		
Мужчины [Male]	1,24 (0,02–4,96)	1,13 (0,02–5,29)
Женщины [Female]	0,61 (0,001–3,06)	0,57 (0,001–2,93)
Медиана накопленных доз на красный костный мозг**, Гр [The median of accumulated dose to red bone marrow, Gy]:		
Мужчины [Male]	0,89 (0,31–1,86)	0,86 (0,26–1,76)
Женщины [Female]	0,39 (0,11–0,95)	0,42 (0,14–0,87)
Средний период радиационного воздействия, лет [The average period of radiation exposure, years]		
Мужчины [Male]	14,3	20,4
Женщины [Female]	12,1	13,9
Внутреннее облучение (инкорпорированным плутонием-239) [Internal irradiation (Pu-239)]		
Число работников, подвергшихся внутреннему облучению (инкорпорированным плутонием-239) [The number of workers exposed to internal irradiation (Pu-239)]		
Всего [Total]	35 (41,7%)	140 (46,7%)
Мужчины [Male]	29	106
Женщины [Female]	6	34
Средняя накопленная доза на красный костный мозг*, Гр [The average cumulative dose to red bone marrow, Gy]:		
Мужчины [Male]	0,06 (0,001–0,46)	0,07 (0,0002–1,64)
Женщины [Female]	0,31 (0,003–1,79)	0,08 (0,0008–0,76)
Медиана накопленных доз на красный костный мозг**, Гр [The median of accumulated dose to red bone marrow, Gy]:		
Мужчины [Male]	0,016 (0,005–0,12)	0,016 (0,006–0,06)
Женщины [Female]	0,012 (0,004–0,036)	0,017 (0,005–0,06)
Средний период радиационного воздействия, лет [The average period of radiation exposure, years]:		
Мужчины [Male]	34,3	47,3
Женщины [Female]	36,5	56,5

* – в скобках указан диапазон доз [The range of doses is reported in brackets]

** – в скобках указан интерквартильный размах [The interquartile range is reported in brackets]

В исследуемых группах максимальная накопленная доза внешнего гамма-облучения на красный костный мозг среди женщин достигала 3 Гр, среди мужчин превышала 5 Гр. Наряду с этим, облучению в суммарной дозе внешнего гамма-облучения на красный костный мозг до 1 Гр подверглись 48 (57,1%) работников группы «Случаи» и 177 (59%) человек из группы «Контроли». Высокие уровни облучения персонала ПО «Маяк» объясняются не только сложной радиационной обстановкой в период становления производства, но и недооценкой последствий, связанных с работой с источниками ионизирующего излучения. Следует отметить, что для этого периода найма установленные дозовые пределы профессионального облучения составляли 300 мЗв/год в 1948–1950 гг. и затем 150 мЗв/год до 1960 г. включительно.

Темпы накопления внешних доз радиационного воздействия в сравниваемых группах существенно отличались: средний период радиационного воздействия на производстве в группе работников с онкогематологической патологией составил среди мужчин 14,3 года, среди женщин – 12,1 года; в группе «Контроли» – 20,4 и 13,9 лет соответственно.

Сведения о внутреннем альфа-облучении (инкорпорированным плутонием-239) имелись среди 41,7% (35 работников) группы «Случаи» и 46,7% (140 работников) группы «Контроли». Медианы накопленных доз внутреннего альфа-облучения на красный костный мозг в сравниваемых группах были идентичны (среди мужчин обеих групп – 0,016 Гр; среди женщин группы «Случаи» – 0,012 Гр, группы «Контроли» – 0,017 Гр). Однако максимальная доза внутреннего альфа-облучения плутонием-239 среди мужчин с лейкозами достигала 0,46 Гр, что в 3,6 раза меньше дозы в группе «Контроли» (1,64 Гр). В то же время среди женщин-работниц с онкогематологической патологией отмечалось преобладание максимальной дозы альфа-облучения (1,79 Гр) в сравнении с работницами без лейкоза (0,76 Гр).

Как и для внешнего гамма-облучения, средний период производственного альфа-облучения (инкорпорированным плутонием-239) в группе лейкозов (34,3 года у мужчин и 36,5 лет у женщин) был гораздо короче, чем в группе «Контроли» (47,3 и 56,5 лет соответственно). Превышение периода внутреннего облучения над внешним гамма-облучением в обеих группах объясняется специфичностью профмаршрута некоторых работников, а также смещением средних оценок из-за малого числа лиц, прошедших биофизическое исследование в связи с достаточно поздним введением контроля внутреннего содержания радионуклидов.

Время с момента начала облучения до развития лейкоза в среднем составило $24,9 \pm 2,3$ года, что согласуется с ранее проведенным исследованием в когорте персонала ПО «Маяк» [4]. Минимальный латентный период (1 год 9 месяцев) зарегистрирован у работника радиохимического производства с острым миелолейкозом, чья накопленная доза внешнего гамма-облучения на красный костный мозг составила 0,51 Гр. Соответственно, при рассмотрении календарного периода развития лейкозов у работников ПО «Маяк» 1948–1958 гг. найма отмечено преобладание онкогематологической патологии в первые два десятилетия работы предприятия, при этом почти 40,7% лейкозов манифестировали до 1970 г. Оценки

радиационного риска заболеваемости лейкозами у ликвидаторов аварии на Чернобыльской АЭС свидетельствуют о том, что статистически значимая избыточная заболеваемость лейкозами, которая может быть связана с внешним гамма-облучением, проявляется в первое десятилетие после облучения [8].

Структура лейкозием у персонала ПО «Маяк» 1948–1958 гг. найма с указанием средней накопленной дозы радиационного воздействия представлена в таблице 3.

Ведущее место в структуре злокачественных нарушений кроветворения занимали миелолейкозы – 47,6% (40 случаев в группе в целом), из них 60% отнесены к острым миелолейкозам (24 случая) и 35% (14 случаев) – к хроническому миелолейкозу. Второе место занимали лейкозы неуточненного клеточного типа – 22,6% (19 случаев), подавляющее большинство которых (16 случаев)

расценены как острые нарушения костномозгового кроветворения. Согласно современной классификации онкогематологической патологии ВОЗ от 2008 г. [15], эта разновидность лейкозов трактуется как острые лейкозы неопределенной дифференцировки (недифференцируемые и со смешанным фенотипом).

Достаточно большое количество лейкозов неуточненного клеточного типа у персонала ПО «Маяк» можно также объяснить отсутствием на тот момент времени высокотехнологичных лабораторных методов, позволяющих отнести лейкоз к определенной клеточной линии. Годы выявления этих видов острого лейкоза – 1964–2007 гг., для первых лет этого периода была характерна диагностика болезней крови, опиравшаяся на клинические симптомы, обусловленные изменениями в составе периферической крови, в отличие от современных алгоритмов диагности-

Структура лейкозов у персонала ПО «Маяк» 1948–1958 гг. найма

Таблица 3

[Table 3]

Leukemia structure of Mayak PA workers employed in 1948–1958]

Тип лейкоза [Leukemia type]	Число случаев [Number of cases]	Средняя накопленная доза облучения на красный костный мозг, Гр [The average cumulative dose to red bone marrow, Gy]					
				Внешнее гамма-облучение [External gamma irradiation]		Внутреннее альфа-облучение (Pu-239)* [Internal irradiation (Pu-239)]	
		Всего [Total]	Муж. [Male]	Жен. [Female]	Муж. [Male]	Жен. [Female]	Муж. [Male]
Лимфолейкоз [Lymphoid leukaemia]:	12 (14,3%)	9	3	0,94	0,24	0,0067	0,004
Острый [Acute]	1	1	–	0,19	–	0,005	–
Хронический [Chronic]	10	7	3	0,97	0,24	0,08	0,004
Неуточненный [Unspecified]	1	1	–	1,48	–	–	–
Миелолейкоз [Myeloid leukaemia]:	40 (47,6%)	31	9	1,51	0,92	0,068	1,78
Острый [Acute]	24	18	6	1,85	1,06	0,086	1,78
Хронический [Chronic]	14	13	1	1,04	0,42	0,049	–
Неуточненный [Unspecified]	2	–	2	–	0,73	–	–
Моноцитарный лейкоз [Monocytic leukaemia]:	2 (2,4%)	2	–	0,63	–	0,008	–
Острый [Acute]	1	1	–	0,49	–	0,008	–
Хронический [Chronic]	1	1	–	0,77	–	–	–
Другие уточненные лейкозы [Other leukaemias of specified cell type]:	11 (13,1%)	7	4	1,78	0,41	0,076	0,015
Острый эритромиелоз [Acute erythroid leukaemia]	8	5	3	2,21	0,54	0,099	0,021
Хронический эритромиелоз [Chronic erythroid leukaemia]	2	1	1	0,19	0	0,005	0,003
Прочие [Other specified leukaemias]	1	1	–	1,17	–	–	–
Лейкоз неуточненного клеточного типа [Leukaemia of unspecified cell type]:	19 (22,6%)	15	4	0,7	0,41	0,012	0,018
Острый [Acute]	16	12	4	0,44	0,41	0,012	0,018
Хронический [Chronic]	1	1	–	2,69	–	–	–
Неуточненный [Unspecified]	2	2	–	1,29	–	–	–
Всего [All leukemias]	84 (100%)	64	20				

*- из числа лиц, прошедших биофизическое исследование [from among persons who have completed a biophysical study].

ки гематологических неоплазм. Следует также учесть, что среди этой группы лейкозов почти 85% работников (16 чел.) являлись мигрантами, выехавшими из города в 1952–1967 гг., для некоторых из них в медицинских документах и сведениях из иногородних учреждений отсутствовала информация о морфологическом уточнении лейкемии.

Следующее ранговое место занимали лимфолейкозы – 12 случаев (14,3%), из которых 10 случаев принадлежали к хроническим лимфолейкозам (ХЛЛ), продолжительность латентного периода которых от момента начала облучения до манифестации колебалась от 28 до 48 лет. ХЛЛ в исследуемой группе чаще обнаруживался у лиц старше 65 лет. Вопрос о причастности ХЛЛ к радиационно-индуцированным эффектам является спорным. Так, Hsu W. et al. [5] в когорте жертв атомной бомбардировки, используя простую возрастную и гендерно-скорректированную базовую модель оценки дозозависимого риска возникновения ХЛЛ, обнаружили значительный линейный ответ дозы и предположили, что риск возникновения ХЛЛ может быть увеличен при более высоких дозах. Эти результаты согласуются с исследованиями лейкозов у ликвидаторов аварии на Чернобыльской АЭС [16, 17] и последствий радиационного воздействия в урановых шахтах [18]. В то же время никаких свидетельств увеличения радиогенного риска ХЛЛ в других исследованиях на различных когортах не наблюдалось [6, 7, 19].

Среди других уточненных лейкозов, составляющих 13,1% (11 случаев) всех лейкемий у персонала ПО «Маяк», в период 1954–1999 гг. диагностировано 10 случаев эрит-ролейкозов, большинство из которых относились к острому поражению эритроидного ростка кроветворения (8 чел.); 2 случая отнесены к хроническому эритромиелозу. В современной классификации ВОЗ [15] бластные лейкозы, миелопролиферация при которых исходит из предшественников эритробластов, называются «эритроидными злокачественными опухолями».

Самой редкой формой лейкемического процесса среди работников ПО «Маяк» был моноцитарный лейкоз, диагностированный в 2,4% (2 случая у мужчин) среди всех разновидностей лейкемий. Известно, что риск возникновения моноцитарного лейкоза увеличивается по мере старения, в исследуемой группе оба случая этого вида лейкоза характеризовались поздним началом (у лиц старше 70 лет) и быстро прогрессирующим течением.

Самым коротким средним латентным периодом в исследуемой группе характеризовался острый лимфобластный лейкоз (13 лет). Острый миелолейкоз наблюдался у работников в среднем через 14,3 года от начала работы на ПО «Маяк». Средний период от момента начала радиационного воздействия до манифестации ЗНО, достигавший более 40 лет, отмечался при лейкозах неутонченного клеточного типа (41,3 года), ХЛЛ (41,4 года) и остром моноцитарном лейкозе (42 года).

Дозовые нагрузки, при которых наблюдалось формирование лейкозов, отличались большим разнообразием. Средняя накопленная доза внешнего гамма-облучения, при которой регистрировался наиболее часто встречающийся острый миелолейкоз, достигала среди мужчин $1,85 \pm 0,34$ Гр, среди женщин – $1,06 \pm 0,44$ Гр. Если среди мужчин с онкогематологической патологией в большин-

стве случаев регистрировались суммарные дозы внешнего гамма-облучения свыше 1 Гр, то среди женщин, за исключением острого миелолейкоза, средние дозы находились в интервале от 0,24 до 0,73 Гр.

Средние дозы внешнего гамма-облучения свыше 2 Гр отмечены среди мужчин с хроническими лейкозами неутонченного клеточного типа и острыми эритромиеломами (2,69 Гр и 2,21 Гр соответственно). В то же время случаи хронического эритромиелома и острого лимфобластного лейкозов диагностированы у работников со средней накопленной дозой внешнего гамма-облучения на красный костный мозг, не достигающей 0,2 Гр.

В связи с относительно небольшим числом лиц, обследованных на содержание радионуклидов, выводы по средним дозам внутреннего альфа-облучения следует делать осторожно. Так, среди лейкозов неутонченного клеточного типа только у двоих работников имелись количественные оценки доз внутреннего альфа-облучения (инкорпорированным плутонием-239). Можно лишь отметить, что средние накопленные дозы внутреннего альфа-облучения варьировали в широких пределах от 0,003 до 1,78 Гр. Максимальная доза внутреннего облучения (1,78 Гр) зарегистрирована у работницы ПО «Маяк», проработавшей на плутониевом производстве в течение 12 лет и умершей от острого миелолейкоза в возрасте 42 лет.

Таким образом, лейкозы у персонала ПО «Маяк» характеризовались многообразием клинических форм и различными сценариями радиационного воздействия на производстве. Наличие в БД информации на каждого работника о клеточном составе крови дает возможность проанализировать динамику гемопоэза пропорционально накопленной дозе; проследить особенности гематологических сдвигов в результате более интенсивного накопления суммарных доз в группе персонала с онкогематологической патологией по сравнению с контролем; выявить особенности восстановления кроветворения после прекращения контакта персонала с ионизирующей радиацией.

В качестве индикаторов ответа системы кроветворения на пролонгированное радиационное воздействие могут рассматриваться различные гематологические индексы, хорошо изученные на сегодняшний день и применяемые в клинической практике и эпидемиологических исследованиях [20–23]. Несмотря на широкое внедрение в медицине новых методов, морфологический анализ крови и подсчет интегральных лейкоцитарных индексов не утрачивают своего значения благодаря большой информативности и методической доступности [23]. В частности, интегральные показатели лейкограммы позволяют оценить тяжесть процесса, степень резистентности организма, определить прогноз заболевания [20].

Значительный объем собранной информации в БД позволяет провести расчет интегральных лейкоцитарных индексов для каждого работника в группе лейкозов и группе внутреннего контроля, что может внести свой вклад в изучение механизмов ответа системы кроветворения на действие ионизирующего облучения с различной мощностью и диапазоном доз, а также групповой и индивидуальной радиочувствительности.

Кроме того, БД может стать основой для разработки математической модели риска радиогенных лейкозов,

способной оценивать на количественном уровне избыточный относительный риск возникновения ЗНО кроветворной ткани среди лиц, подвергающихся длительному радиационному воздействию на производстве. Научный интерес представляют вопросы математического моделирования оценок риска гематологической патологии, в том числе гемобластозов, и прогнозирования влияния хронического облучения на кроветворную систему в зависимости от мощности дозы [24, 25].

Заключение

Созданная в лаборатории радиационной эпидемиологии ЮУрИБФ компьютерная база данных «Лейкозы в когорте персонала производственного объединения «Маяк» 1948–1958 гг. найма», содержит, помимо 19 593 морфологических анализов крови, клинические и дозиметрические сведения о работниках, нанятых в период становления первого в стране предприятия атомной энергетики. Теоретическая новизна исследований на основе БД будет заключаться в выявлении особенностей реагирования системы кроветворения персонала предприятия ядерного цикла в зависимости от распределения облучения во времени.

В качестве перспективных направлений использования БД могут рассматриваться: определение доз, при которых наблюдаются индукция лейкозов и восстановление клеточного состава крови; выявление отличий в радиочувствительности гемопоэза и обозначение дозового интервала для радиоадаптации; расчет лейкомогенного риска в зависимости от темпов накопления дозы внешнего гамма-облучения. Анализ риска онкогематологической патологии, связанной с пролонгированным радиационным воздействием, позволит предложить конкретные шаги по усовершенствованию радиационной безопасности персонала радиационно-опасных объектов.

Литература

1. Зюбина, Л.Ю. Эволюционные особенности гематологических синдромов заболеваний крови от воздействия вредных производственных факторов / Л.Ю. Зюбина, Л.А. Паначева, Л.А. Шпагина, Н.П. Карева, О.С. Котова, М.А. Зуева, А.М. Горобей, Н.В. Камнева // Медицина труда и промышленная экология. – 2019. – № 1. – С. 45-50.
2. Байсоголов, Г.Д. Злокачественные новообразования кроветворной и лимфатической тканей у персонала первого предприятия атомной промышленности / Г.Д. Байсоголов, М.Г. Байсоголов, И.А. Галстян, А.К. Гуськова, Н.А. Кошурникова // Вопросы онкологии. – 1991. – Т. 37, № 5. – С. 553-559.
3. Муксинова, К.Н. Значение индивидуальных особенностей миелопоэза в реализации лейкомогенного действия ионизирующего излучения / К.Н. Муксинова, Л.Д. Мурзина, В.С. Ревина // Медицинский вестник Башкортостана. – 2009. – Т. 4, № 2. – С. 109-113.
4. Azizova T.V., Korobkin A.V., Osovets S.V., Bannikova M.V. Latency period of acute leukemia in the cohort of Mayak workers. In: Chronic radiation exposure: low-dose effects. Book of Abstracts of the 4th International Conference; 2010 November 9-11; Chelyabinsk: Publishers: Chelyabinsk State Medical Academy, 2010, pp. 14-15.
5. Hsu W-L, Preston DL, Soda M, et al. The incidence of leukemia, lymphoma and multiple myeloma among atomic bomb survivors: 1950-2001. *Radiat Res.* 2013; 179(3):361-82.
6. Kuznetsova IS, Labutina EV, Hunter N. Radiation risks of Leukemia, Lymphoma and Multiple Myeloma incidence in the Mayak Cohort: 1948-2004. *PLoS ONE.* 2016; 11(9):e0162710.
7. Preston DL, Sokolnikov ME, Krestinina LY, Stram DO. Estimates of Radiation Effects on Cancer Risks in the Mayak Worker, Techa River and Atomic Bomb Survivor Studies. *Radiation Protection Dosimetry.* 2017; 173(1-3):26-31.
8. Иванов, В.К. Заболеваемость и смертность от лейкозов участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС: оценка радиационных рисков за период наблюдения с 1986 по 2014 гг. / В.К. Иванов., В.В. Кашеев, С.В. Карпенко, С.Е. Глебова, К.А. Туманов, С.Ю. Чекин, М.А. Максюттов, А.М. Корело, С.С. Ловачев, С.А. Иванов, А.Д. Каприн // Радиационная гигиена. – 2018. – Т. 11, № 4. – С. 7-17.
9. Рожко, А.В. Заболеваемость лейкозами у лиц, пострадавших в результате радиационных аварий (обзор литературы) / А.В. Рожко, А.А. Чешик // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. – 2014. – № 2 (12). – С. 6-13.
10. Кошурникова, Н.А. Характеристика когорты рабочих атомного предприятия ПО «Маяк» (часть II) / Н.А. Кошурникова, Н.С. Шильникова, П.В. Окотенко, В.В. Креслов, М.Г. Болотникова, М.Э. Сокольников, С.А. Романов, В.Ф. Хохряков, К.Г. Суслова, Е.К. Василенко // Вопросы радиационной безопасности. – 1998. – № 3. – С. 48-58.
11. Международная статистическая классификация болезней и проблем, связанных со здоровьем, десятый пересмотр (МКБ-X), Том 1. – М.: Медицина, 1998. – 741 с.
12. Zhdanov A, Vostrotn V, Efimov A, Birchall A, Puncher M. The Mayak Worker Dosimetry System (MWDS-2013): Implementation of the dose calculations. *Radiation Protection Dosimetry.* 2017; 176(1-2):163-5.
13. Соснина, С.Ф. Гемобластозы у потомков работников радиационно опасных производств / С.Ф. Соснина, Н.Р. Кабинова, М.Э. Сокольников, П.В. Окотенко // Анализ риска здоровью. – 2016. – № 4. – С. 23-30.
14. Голивец, Т.П. Анализ мировых и российских тенденций онкологической заболеваемости в XXI веке / Т.П. Голивец, Б.С. Коваленко // Научный результат. Серия: Медицина и фармация. – 2015. – Т.1, №4. – С. 79-86.
15. Swerdlow SH, Campo E, Harris NL, et al. WHO Classification of Tumors of Haematopoietic and Lymphoid Tissues. Lyon: IARC-press; 2008, 439 p.
16. Zablotska LB, Bazyka D, Lubin JH, et al. Radiation and the risk of chronic lymphocytic and other leukemias among Chernobyl cleanup workers. *Environ. Health Perspect.* 2013; 121(1):59-65.
17. Romanenko AY, Finch SC, Hatch M, et al. The Ukrainian-American study of leukemia and related disorders among Chernobyl cleanup workers from Ukraine: III. Radiation risks. *Radiat Res.* 2008; 170(6):711-20.
18. Rericha V, Kulich M, Rericha R, et al. Incidence of leukemia, lymphoma, and multiple myeloma in Czech uranium miners: a case-cohort study. *Environ Health Perspect.* 2006; 114(6):818-22.
19. NRC. Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation (Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation, BEIR VII – Phase 2). Washington D.C.: National Research Council, National Academy Press; 2006, 424 p.
20. Банзаракшеев, В.Г. Лейкоцитарные индексы как способ оценки эндогенной интоксикации организма / В.Г. Банзаракшеев // Acta Biomedica Scientifica. – 2010. – № 3 (73). – С. 390-391.
21. Волосников, Д.К. Клиническое значение эритроцитарных индексов у недоношенных новорожденных с синдромом полиорганной недостаточности / Д.К. Волосников, Е.Н. Серебрякова // Российский вестник перинатологии и педиатрии. – 2011. – Т. 56, № 1. – С. 17-32.

22. Faria SS, Fernandes PC, Barbosa Silva MJ [et al.] The neutrophil-to-lymphocyte ratio: a narrative review. *Ecaner*. 2016; 10:702.
23. Тимашева, Г.В. Интегральные лейкоцитарные индексы при оценке интоксикации в условиях воздействия химических факторов / Г.В. Тимашева, Л.М. Масягутова, А.Б. Бакиров // Медицина труда и промышленная экология. – 2017. – № 9. – С. 190-191.
24. Fliedner TM, Graessle DH. Hematopoietic cell renewal systems: mechanisms of coping and failing after chronic exposure to ionizing radiation. *Radiat Environ Biophys*. 2008 Feb; 47(1):63-9.
25. Akushevich IV, Veremeyeva GA, Dimov GP, et al. Modeling hematopoietic system response caused by chronic exposure to ionizing radiation. *Radiat Environ Biophys*. 2011 May; 50(2):299-311.

Поступила: 04.07.2019 г.

Соснина Светлана Фаридовна – кандидат медицинских наук, научный сотрудник лаборатории радиационной эпидемиологии, Федеральное государственное унитарное предприятие Южно-Уральский институт биофизики ФМБА России. Адрес для переписки: 456780, Россия, Озёрск, Челябинская область, Озёрское шоссе, 19; E-mail: sosnina@subi.su

Окатенко Павел Викторович – руководитель группы компьютерного и программного обеспечения, лаборатория радиационной эпидемиологии, Федеральное государственное унитарное предприятие Южно-Уральский институт биофизики ФМБА России, Озёрск, Россия

Юркин Александр Михайлович – инженер-программист лаборатории радиационной эпидемиологии, Федеральное государственное унитарное предприятие Южно-Уральский институт биофизики ФМБА России, Озёрск, Россия

Рогачева Сусанна Александровна – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник лаборатории радиационной эпидемиологии, Федеральное государственное унитарное предприятие Южно-Уральский институт биофизики ФМБА России, Озёрск, Россия

Груздева Елена Александровна – младший научный сотрудник лаборатории радиационной эпидемиологии, Федеральное государственное унитарное предприятие Южно-Уральский институт биофизики ФМБА России, Озёрск, Россия

Сокольников Михаил Эдуардович – доктор медицинских наук, заведующий отделом эпидемиологии, Федеральное государственное унитарное предприятие Южно-Уральский институт биофизики ФМБА России, Озёрск, Россия

Для цитирования: Соснина С.Ф., Окатенко П.В., Юркин А.М., Рогачева С.А., Груздева Е.А., Сокольников М.Э. Лейкомогенный риск и темп накопления радиационной дозы. Сообщение 1: Характеристика исследуемой группы работников производственного объединения «МАЯК» // Радиационная гигиена. – 2019. – Т.12, № 4. – С. 18–28. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-18-28

Leukemia risk and the pattern of dose accumulation. Part 1: Characteristics of the study group of the Mayak Production Association personnel

Svetlana F. Sosnina, Pavel V. Okatenko, Aleksandr M. Yurkin, Susanna A. Rogacheva, Elena A. Gruzdeva, Mikhail E. Sokolnikov

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

Results of development of the database “Leukemia in the cohort of workers of the Mayak Production Association employed in 1948-1958” that was developed in the Laboratory of Radiation Epidemiology of Southern Urals Biophysics Institute were presented. The database contains hematological, clinical and dosimetric information for the workers of main plants of the first production facility of Soviet atomic industry employed in the period of production development – 1948-1958. The computer database contains information for two groups of Mayak Production Association workers: main group of workers with leukemia as the main cause of death

Svetlana F. Sosnina

Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical and Biological Agency of Russia.

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

($n=84$) and group of personnel without hematological cancer pathology for comparison ($n=300$). The comparison group was composed in such a way to allow 3-4 controls of corresponding gender, age of exposure start, accumulated dose of external gamma-exposure to red bone marrow for each leukemia case. Methods of data collection and sources of medical data were described. Characteristics of software developed for the database was presented. The database containing a total of 19593 results of blood tests reflects dynamics of hematological values in atomic facility personnel due to prolonged radiation exposure. The range of accumulated absorbed doses of external gamma-exposure to red bone marrow in the group of personnel with leukemia diagnoses was 0.001-4.96 Gy; average dose for males was 1.24 Gy and 0.61 Gy – for females. Similar range is observed in the group of personnel without leukemia outcomes. Alongside differences in accumulation rates of external radiation exposure doses is evident: in the group of workers with hematological cancer pathology the average period of radiation exposure at production facility was 14.3 years for males and 12.1 years for females; in the comparison group – 20.4 and 13.9 years, respectively. Most leukemia cases were diagnosed in the workers of radiochemical facility (54.8%). Myeloid leukemia prevailed (47.6%) in the leukemia structure; among them acute myeloid leukemia made more than a half of the cases; lymphoid leukemia was diagnosed in 14.3% cases with prevailing role of chronic lymphoid leukemia. Acute and chronic monocytic leukemia were the rarest types of malignant neoplasms of hematopoietic tissue. Possible correlation between hematological values with individual doses of external gamma- and internal alpha-exposure (incorporated Pu-239) distributed over time was stated. The database allows calculating integrated leukocytic indices reflecting response of hemopoietic system to radiation exposure, tracking changes in hemopoiesis in proportion to accumulated dose to red bone marrow, analyzing specific characteristics of rehabilitation of hematological alterations after occupational contact to ionizing radiation is terminated. Information on acute and chronic diseases available for the workers in the database allows excluding non-specific response of hemopoietic system caused by associated pathology. A revision of leukemia risk estimated in the relation to dose rate for personnel exposed to chronic radiation could be regarded as one of perspective trends in using the database.

Key words: leukemia risk, radiation exposure, Mayak Production Association personnel, hemopoietic system, database.

References

- Zyubina L.Yu., Panacheva L.A., Shpagina L.A., Kareva N.P., Kotova O.S., Zueva M.A., Gorobey A.M., Kamneva N.V. Evolutionary features of hematological syndromes of blood diseases due to exposure to hazardous production factors. *Meditcina truda i promyshlennaya ekologiya = Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2019; 1:45-50 (in Russian).
- Baysogolov G.D., Baysogolov M.G., Galstyan I.A., Guskova A.K., Koshurnikova N.A. Malignant neoplasms of hematological and lymphoid tissues in workers of the first atomic production facility. *Voprosy onkologii = Problems in oncology*. 1991; 37(5): 553-9 (in Russian).
- Muksinova K.N., Murzina L.D., Revina V.S. Contribution of individual peculiarities of myelopoiesis to manifestation of leukogenic effect of ionizing. *Meditinskiy vestnik Bashkortostana = Bashkortostan Medical Journal*. 2009; 4(2): 109-13 (in Russian).
- Azizova T.V., Korobkin A.V., Osovets S.V., Bannikova M.V. Latency period of acute leukemia in the cohort of Mayak workers. In: *Chronic radiation exposure: low-dose effects. Book of Abstracts of the 4th International Conference*; 2010 November 9-11; Chelyabinsk: Publishers: Chelyabinsk State Medical Academy, 2010, pp. 14-15.
- Hsu W-L, Preston DL, Soda M, et al. The incidence of leukemia, lymphoma and multiple myeloma among atomic bomb survivors: 1950-2001. *Radiat. Res*. 2013; 179(3): 361-82.
- Kuznetsova IS, Labutina EV, Hunter N. Radiation risks of Leukemia, Lymphoma and Multiple Myeloma incidence in the Mayak Cohort: 1948-2004. *PLoS ONE*. 2016; 11(9):e0162710.
- Preston DL, Sokolnikov ME, Krestinina LY, Stram DO. Estimates of Radiation Effects on Cancer Risks in the Mayak Worker, Techa River and Atomic Bomb Survivor Studies. *Radiation Protection Dosimetry*. 2017; 173(1-3):26-31.
- Ivanov V.K., Kashcheev V.V., Karpenko S.V., Glebova S.E., Tumanov K.A., Chekin S.Yu., Maksyutov M.A., Korelo A.M., Lovachev S.S., Ivanov S.A., Kaprin A.D. Incidence and mortality from leukemia among individuals who took part in liquidating the consequences of Chernobyl radiation accident: assessment of radiation risks for the follow-up period from 1986 to 2014. *Radiatsionnaya gygiyena = Radiation Hygiene*. 2018; 11(4): 7-17 (in Russian).
- Rozhko A.V., Cheshik A.A. Leukemia incidence among individuals affected by radiation accidents (literature review). *Mediko-biologicheskie problemy zhiznedeyatel'nosti = Medical and biological problems of life activity*. 2014; 2 (12): 6-13 (in Russian).
- Koshurnikova N.A., Shilnikova N.S., Okatenko P.V., Kreslov V.V., Bolotnikova M.G., Sokolnikov M.E., Romanov S.A., Khokhryakov V.F., Suslova K.G., Vasilenko E.K. Characteristics of the cohort of workers of the atomic facility Mayak PA (part II). *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Radiation Safety Problems*. 1998; 3: 48-58 (in Russian).
- International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems 10th Revision (ICD-10), Vol.1. Moscow: Medicine; 1998 (in Russian).
- Zhdanov A, Vostrotin V, Efimov A, Birchall A, Puncher M. The Mayak Worker Dosimetry System (MWDS-2013): Implementation of the dose calculations. *Radiation Protection Dosimetry*. 2017; 176(1-2):163-5.
- Sosnina S.F., Kabirova N.R., Sokolnikov M.E., Okatenko P.V. Hemoblastoses in offspring of radiation hazardous industries workers. *Analiz riska zdorov'yu = Health Risk Analysis*. 2016; 4: 23-30 (in Russian).
- Golivets T.P., Kovalenko B.S. Analysis of global and Russian cancer incidence trends on XXI century. *Nauchnyy rezultat. Seriya: Meditsina i farmatsiya = Research Result. Series: Medicine and pharmacy*. 2015; 1(4): 79-86 (in Russian).
- Swerdlow SH, Campo E, Harris NL, et al. WHO Classification of Tumors of Haematopoietic and Lymphoid Tissues. Lyon: IARC-press; 2008, 439 p.
- Zablotska LB, Bazyka D, Lubin JH, et al. Radiation and the risk of chronic lymphocytic and other leukemias among Chernobyl cleanup workers. *Environ. Health Perspect*. 2013; 121(1): 59-65.
- Romanenko AY, Finch SC, Hatch M, et al. The Ukrainian-American study of leukemia and related disorders among Chernobyl cleanup workers from Ukraine: III. Radiation risks. *Radiat Res*. 2008; 170(6): 711-20.

18. Rericha V, Kulich M, Rericha R, et al. Incidence of leukemia, lymphoma, and multiple myeloma in Czech uranium miners: a case-cohort study. *Environ Health Perspect.* 2006; 114(6): 818–22.
19. NRC. Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation (Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation, BEIR VII – Phase 2). Washington D.C.: National Research Council, National Academy Press; 2006, 424 p.
20. Banzaraksheev V.G. Leukocytic indices as a method for assessing endogenous intoxication of the body. *Acta Biomedica Scientifica.* 2010; 3(73): 390–1 (in Russian).
21. Volosnikov D.K., Serebryakova E.N. Clinical significance of erythrocytic indices in premature newborn babies with multiple organ failure syndrome. *Rossiyskiy vestnik perinatologii i pediatrii* = Russian Bulletin of perinatology and pediatrics. 2011; 56(1): 17–32 (in Russian).
22. Faria SS, Fernandes PC, Barbosa Silva MJ, et al. The neutrophil-to-lymphocyte ratio: a narrative review. *Ecancer.* 2016; 10:702.
23. Timasheva G.V., Masyagutova L.M., Bakirov A.B Integral leukocytic indices in the course of intoxication assessment under exposure to chemical factors. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya* = Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology. 2017; 9: 190–1 (in Russian).
24. Fliedner TM, Graessle DH. Hematopoietic cell renewal systems: mechanisms of coping and failing after chronic exposure to ionizing radiation. *Radiat Environ Biophys.* 2008 Feb; 47(1):63–9.
25. Akushevich IV, Veremeyeva GA, Dimov GP, [et al.] Modeling hematopoietic system response caused by chronic exposure to ionizing radiation. *Radiat Environ Biophys.* 2011 May; 50(2):299–311.

Received: July 04, 2019

For correspondence: Svetlana F. Sosnina – Candidate of medical sciences, researcher in the Laboratory of Radiation Epidemiology, Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical and Biological Agency of Russia (Ozerskoe shosse, 19, Ozersk, 456780, Chelyabinsk oblast, Russia; E-mail: sosnina@subi.su)

Pavel V. Okatenko – Head of computer and software support group, Laboratory of Radiation Epidemiology, Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, Ozersk, Russia

Aleksandr M. Yurkin – Programmer engineer of the Laboratory of Radiation Epidemiology, Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, Ozersk, Russia

Susanna A. Rogacheva – Candidate of medical sciences, senior researcher in the Laboratory of Radiation Epidemiology, Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, Ozersk, Russia

Elena A. Gruzdeva – Junior researcher of the Laboratory of Radiation Epidemiology, Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, Ozersk, Russia

Mikhail E. Sokolnikov – Head of the Epidemiology Department, Doctor of medical sciences, Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, Ozersk, Russia

For citation: Sosnina S.F., Okatenko P.V., Yurkin A.M., Rogacheva S.A., Gruzdeva E.A., Sokolnikov M.E. Leukemia risk and the pattern of dose accumulation. Part 1: Characteristics of the study group of the Mayak Production Association personnel. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene, 2019, Vol. 12, No. 4, pp. 18–28. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-18-28

Результаты контроля доз облучения хрусталиков глаз у медицинского персонала г. Санкт-Петербурга

Е.Н. Шлеенкова, В.Ю. Голиков, Г.Н. Кайдановский, С.Ю. Бажин, В.А. Ильин

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

В работе представлены и проанализированы результаты индивидуального дозиметрического контроля персонала рентгенохирургических бригад нескольких клинических больниц г. Санкт-Петербурга. Измерения операционных величин — индивидуальных эквивалентов доз $H_p(3)$ и $H_p(10)$ проводились методом термолюминесцентной дозиметрии. Дозиметры, предназначенные для измерения $H_p(3)$, располагались в области лба оператора, а для определения $H_p(10)$ — как над индивидуальным защитным фартуком оператора в области воротничка или груди, так и под защитным фартуком в области груди. Были обработаны и проанализированы результаты 34 измерений годовых значений $H_p(3)$ и $H_p(10)$, измеренных над фартуком, и 24 значений $H_p(10)$, измеренных под фартуком. Результаты статистической обработки показали, что вероятность превышения годовых значений $H_p(3)$ у персонала рентгенохирургических бригад нового предела дозы 20 мЗв мала, — менее 1%. Превышение же существующего в настоящее время дозового предела эквивалентной дозы облучения хрусталика глаза (150 мЗв) вообще вряд ли возможно в нормальных условиях. Наилучшим решением для оценки дозы облучения хрусталика глаза является измерение индивидуального эквивалента дозы $H_p(3)$ с помощью соответствующим образом откалиброванного ТЛ-дозиметра (термолюминесцентный дозиметр), расположенного вблизи глаз работника. Однако этот дополнительный дозиметр необходим только в случае, когда значение эквивалентной дозы облучения хрусталика глаза может приблизиться к новому значению предела дозы 20 мЗв. По результатам проведенного исследования введение такого дополнительного дозиметра возможно, если годовое значение $H_p(10)$, регистрируемое дозиметром, расположенным над защитным фартуком, больше 10 мЗв.

Ключевые слова: индивидуальный дозиметрический контроль, эквивалентная доза хрусталика глаза, индивидуальный эквивалент дозы.

Введение

В последние годы в перечне вопросов радиационного контроля и радиационной безопасности актуальным является вопрос облучения хрусталиков глаз. Основным эффектом облучения хрусталика глаза является радиационная катаракта, считающаяся в настоящее время детерминированным эффектом. По данным НКДАР ООН [1], риск возникновения радиационно-индуцированной катаракты оказался более высоким, чем это считалось ранее. Международная комиссия по радиационной защите (МКРЗ) в 2011 г. определила пороговое значение поглощенной дозы для образования катаракты хрусталика глаза равным 0,5 Гр [2] как для острого, так и для хрониче-

ского облучения (предыдущее значение было равным 5 Гр). В связи с этим было введено новое значение годового дозового предела для эквивалентной дозы в хрусталиках глаз 20 мЗв, усредненное за 5 последовательных лет (100 мЗв за 5 лет), но не более 50 мЗв за любой отдельный год [3]. Новый дозовый предел уже введен в ряде стран. Следует ожидать, что в ближайшие годы в России также будет принят новый дозовый предел. До введения нового дозового предела актуальность проведения индивидуального дозиметрического контроля облучения хрусталика глаза была невысокой, поскольку величина существующего в настоящее время в России дозового предела — 150 мЗв/год¹ [4] в нормальных (неаварийных)

¹ Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности. Зарегистрировано в Минюсте РФ 14.08.2009 № 14534. [Sanitary rules and norms. SanPiN 2.6.1.2523-09. Norms of the radiation safety (NRB 99/2009). Registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation 14.08.2009 N 14534.]

Голиков Владислав Юрьевич

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева.
Адрес для переписки: 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: sg235@rambler.ru

условиях облучения не превышалась. Предварительный анализ литературных данных показывает, что новый дозовый предел может быть превышен при проведении ряда работ с использованием источников ионизирующего излучения [5]. В документах МАГАТЭ [6] и Публикации 139 МКРЗ [7] говорится о нескольких офтальмологических исследованиях, проведенных на выборке интервенционных кардиологов и медсестер. Было установлено, что примерно 40–50% интервенционистов и 20–40% техников или медсестер имеют помутнения хрусталика глаза, соответствующие повреждениям, полученным в результате воздействия ионизирующего излучения. Уровень заболеваемости у интервенционистов был в 4–5 раз выше, чем у необлученных лиц в контрольной группе (примерно 40–50% против 10%).

В связи с вышесказанным проведение измерений индивидуального эквивалента дозы $H_p(3)$, являющегося консервативной оценкой эквивалентной дозы в хрусталиках глаз, представляется весьма актуальным. Еще в 2000 г. МКРЗ в своей Публикации № 85 [8] подчеркивала повышенный риск облучения хрусталиков глаз у медицинского персонала, выполняющего интервенционные и другие исследования под контролем рентгеновского излучения, и рекомендовала носить дополнительный дозиметр над защитным фартуком в районе шеи и головы для оценки доз не защищенных фартуком органов, в том числе хрусталиков глаз. Вопрос о том, как оценивать дозу в хрусталиках глаз на основе показаний этого дозиметра, исследовался, в частности, в работах [9, 10], где было рекомендовано использовать корректирующий фактор 0,75 для модификации показаний «шейного» дозиметра с целью оценки эквивалентной дозы в хрусталиках глаз. Конечно, идеальным вариантом является использование отдельного дозиметра, калиброванного в терминах индивидуального эквивалента дозы $H_p(3)$ и расположенного вблизи глаз оператора. Однако использование дополнительного дозиметра, во-первых, усложняет и удорожает проведение ИДК и, во-вторых, может вызвать возражение врачей из-за возможных помех при выполнении их прямых обязанностей. Поэтому, согласно опросам представителей европейских учреждений, осуществляющих ИДК медицинского персонала [11], они планируют после введения нового предела дозы (20 мЗв) продолжать использовать существующие индивидуальные дозиметры и корректирующие факторы для оценки эквивалентной дозы в хрусталиках глаз, а дополнительный «глазной» дозиметр использовать только в ситуациях, когда годовая эквивалентная доза в хрусталиках глаз может приблизиться к значению 20 мЗв.

Ранее нами с целью определения категорий персонала, подвергающихся наибольшему риску облучения хрусталика глаза, было проведено исследование, которое

также показало, что наиболее облучаемой категорией медицинского персонала в этом смысле являются члены рентгенохирургических бригад [12]. В настоящей работе представлены новые данные измерений значений $H_p(3)$ у членов рентгенохирургических бригад медицинских организаций г. Санкт-Петербурга.

Цели исследования

1. На основе анализа результатов измерений значений индивидуального эквивалента дозы $H_p(3)$ оценить возможность превышения его значения 20 мЗв/год, – нового дозового предела для хрусталиков глаз.

2. На основе анализа результатов измерений значений индивидуальных эквивалентов дозы $H_p(3)$ и $H_p(10)$ при различных положениях дозиметров на поверхности тела работника оценить возможность определения эквивалентной дозы в хрусталиках глаз по показаниям дозиметра, измеряющего значение $H_p(10)$ над защитным фартуком. Обосновать численное значение критерия, определяющего необходимость ношения дополнительного дозиметра вблизи глаз работника для контроля облучения хрусталика глаза.

Материалы и методы

Нормируемые величины, являющиеся мерой ущерба от воздействия излучения на человека (эффективная доза, эквивалентная доза облучения органа или ткани), не являются непосредственно измеримыми. Поэтому для их консервативной оценки используются операционные величины, однозначно определяемые через физические характеристики поля излучения. Операционной величиной для оценки эквивалентной дозы хрусталика глаза является индивидуальный эквивалент дозы $H_p(3)$. Для оценки эффективной дозы внешнего облучения персонала рентгенохирургических бригад в настоящее время используется комбинация операционных величин – индивидуальных эквивалентов дозы $H_p(10)$, измеренных над и под защитным фартуком работника (МУ 2.6.1.3015-12²):

$$E = 0,60 \cdot H_p^z(10) + 0,025 \cdot H_p^w(10), \text{ мЗв (1)}$$

где: $H_p^z(10)$ – индивидуальный эквивалент дозы, мЗв, зарегистрированный дозиметром, расположенным на груди под защитным фартуком, а $H_p^w(10)$ – индивидуальный эквивалент дозы, мЗв, зарегистрированный дозиметром, расположенным над фартуком на воротнике халата.

Измерения $H_p(3)$ производились с помощью термoluminesцентного дозиметра типа МКД-А с детектором ДТГ-4³. Считывание показаний детекторов осуществлялось на установке ДВГ-02ТМ (Россия)⁴. Основная погрешность результатов измерений $H_p(3)$, согласно свидетельству о поверке, составляла $\pm 30\%$ ($P=0,95$). Дополнительная погрешность за счет энергетической зависимости чув-

² МУ 2.6.1.3015-12. Организация и проведение индивидуального дозиметрического контроля. Персонал медицинских организаций. Радиационная гигиена. 2012;5(3):77-86. [Methodical guidelines 2.6.1.3015-12. "Organization and management of individual dosimetry of medical staff". Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene. 2012;5(3):77-86]

³ Дозиметры термoluminesцентные МКД. Руководство по эксплуатации ФВКМ.412111.004РЭ/ НПП «Доза». [Thermoluminescent dosimeters MCD. Operating Manual ФВКМ.412111.004РЭ/ SPC "Doza"]

⁴ Установка дозиметрическая термoluminesцентная ДВГ-02ТМ. Руководство по эксплуатации ПИГУ.412113.003РЭ/ НПП «Доза». [Dosimetric thermoluminescent sistem DVG-02TM. Operating Manual ПИГУ.412113.003РЭ/ SPC "Doza".]

ствительности детекторов при измерении в полях фотонного излучения с энергией 30–50 кэВ относительно чувствительности к гамма-излучению радионуклида ^{137}Cs не превышала 40%. Экспонируемый дозиметр располагался на шапочке, на лицевой части головы (в области лба) или на дужке защитных очков. Для измерения индивидуального эквивалента дозы $H_p(10)$ использовались термолюминесцентные дозиметры типа DTU-01, содержащие по два детектора ДТГ-4. Считывание показателей данных детекторов осуществлялось на термолюминесцентной дозиметрической системе Harshaw-2000 D (США). Основная погрешность результатов измерений $H_p(10)$ составляла $\pm 20\%$ ($P=0,95$), а дополнительная погрешность за счет энергетической чувствительности детекторов в полях рентгеновского излучения не превышала 30%. Дозиметры для измерения $H_p(10)$ размещались на теле работника на уровне груди под защитным фартуком и над защитным фартуком на уровне груди или на воротничке халата. Диапазон измерения значений ин-

дивидуальных эквивалентов доз $H_p(3)$ и $H_p(10)$ составлял 0,1 мЗв – 100 Зв.

К персоналу рентгенохирургических бригад были отнесены: врачи-хирурги, врачи-анестезиологи и медицинские сестры. Работа персонала в медицинских учреждениях проводилась с использованием ангиографической установки Innova 3100 GE [13] с диапазоном напряжений на аноде рентгеновской трубки 40–125 кВ и расположением трубки под декой стола. Более подробных данных об условиях облучения персонала (вид медицинского исследования, взаимное расположение оператора и пациента, использование стационарных и подвесных защитных средств и т.п.) собрано не было.

Результаты и обсуждение

В таблице представлены измеренные годовые значения индивидуальных эквивалентов дозы $H_p(3)$ и $H_p(10)$ (за вычетом годового значения фона 0,78 мЗв) с помощью дозиметров, расположенных под и над защитным фарту-

Годовые значения $H_p(3)$, $H_p(10)$ и E в мЗв (2016–2018 гг.)
Annual doses $H_p(3)$, $H_p(10)$ and E , in units of mSv (2016–2018)

Таблица

[Table]

№ пп.	Должность [Specialization]	$H_p(3)$	$H_p(10)$ под фартуком [under the apron]	$H_p(10)$ над фартуком [above the apron]	E [effective dose]
1	Врач РЭДил*	7,16	2,64	7,31	1,77
2	Врач РЭДил	0,89	0,90	1,10	0,57
3	Врач РЭДил	2,32	7,0	11,3	4,46
4	Врач РЭДил	6,3	0,52	10,5	0,57
5	Врач-кардиолог [Cardiologist]	0,58	0,44	3,21	0,34
6	Врач РЭДил	0,67	0,35	0,47	0,22
7	Врач РЭДил	0,64	0,42	0,54	0,27
8	Заведующий отделением РХМДил**	0,58	0,13	0,49	0,09
9	Врач РЭДил	2,01	0,30	6,50	0,34
10	Врач РЭДил	0,21	0,74	1,89	0,49
11	Врач РЭДил	0,62	0,11	2,37	0,13
12	Медсестра-анестезист [Anesthetist nurse]	0,73	0,45	0,61	0,29
13	Врач РЭДил	3,94	0,37	2,90	0,29
14	Медсестра-анестезист [Anesthetist nurse]	1,09	0,30	0,60	0,20
15	Врач РЭДил	3,13	0,36	1,36	0,25
16	Врач РЭДил	1,53	0,24	1,29	0,18
17	Врач РЭДил	5,7	0,21	5,30	0,26
18	Врач-кардиолог [Cardiologist]	1,24	0,24	0,51	0,16
19	Врач РЭДил	1,82	0,74	3,26	0,53
20	Врач РЭДил	2,23	1,25	1,82	0,80
21	Врач РЭДил	3,13	0,45	2,36	0,33

Окончание таблицы

№ пп.	Должность [Specialization]	$H_p(3)$	$H_p(10)$ под фартуком [under the apron]	$H_p(10)$ над фартуком [above the apron]	E [effective dose]
22	Заведующий отделением РХМДиЛ	6,48	3,78	5,07	2,39
23	Медсестра-анестезист [Anesthetist nurse]	3,57	2,20	2,84	1,39
24	Медсестра-анестезист [Anesthetist nurse]	1,00	0,33	0,43	0,21
25	Заведующий отделением РЭДиЛ ***	0,67	0,35	–	0,23
26	Врач РЭДиЛ	0,87	0,59	–	0,38
27	Врач-хирург [Surgeon]	9,3	0,84	–	0,74
28	Врач РЭДиЛ	1,01	1,24	–	0,77
29	Врач РЭДиЛ	2,12	0,14	–	0,14
30	Врач-хирург [Surgeon]	4,51	0,11	–	0,18
31	Врач-хирург [Surgeon]	10,7	0,37	–	0,49
32	Заведующий отделением РЭДиЛ	0,87	0,07	–	0,06
33	Врач-хирург [Surgeon]	1,47	0,07	–	0,08
34	Врач РЭДиЛ	1,96	0,03	–	0,07
Тип и параметры распределения [Type and parameters of distribution]		¹⁾ LN (²⁾ GM=1,74 ³⁾ GSD=2,6)	LN (GM=0,41 GSD=3,2)	LN (GM=1,9 GSD=2,8)	LN (GM=0,33 GSD=2,7)

¹⁾LN – логарифмически нормальное распределение; [lognormal distribution]²⁾GM – геометрическое среднее [the geometric mean];³⁾GSD – геометрическое стандартное отклонение [geometric standard deviation].

* – врач рентгеноэндоваскулярной диагностики и лечения [endovascular diagnostic and treatment doctor]

** – заведующий отделением рентгенохирургических методов диагностики и лечения. [Head of department of radiosurgical methods of diagnostics and treatment]

*** – заведующий отделением рентгеноэндоваскулярной диагностики и лечения [Head of the department of Endovascular Diagnostics and Treatment]

ком, а также значения эффективной дозы E , рассчитанные согласно выражению (1). Из 43 измеренных годовых значений $H_p(3)$ и $H_p(10)$ 9 после вычитания фонового значения оказались меньше или равны нулю и были исключены из дальнейшего рассмотрения.

На рисунках 1 и 2 показаны распределения годовых значений $H_p(3)$ и E и их аппроксимация логнормальными распределениями, что было подтверждено с помощью критерия Стьюдента ($p > 0,05$).

Основываясь на параметрах аппроксимирующих логнормальных распределений годовых значений $H_p(3)$ и E , можно показать, что:

– в случае годовой эффективной дозы вероятность ее превышения значения 1 мЗв составляет 13%, а значение 6 мЗв (3/10 от предела дозы) – всего лишь 0,2%;

– в случае годового значения $H_p(3)$ вероятность его превышения значения 6 мЗв (3/10 от нового значения предела дозы) составляет 10%, значения 10 мЗв – 3,3%, а значения 20 мЗв – всего лишь 0,5%.

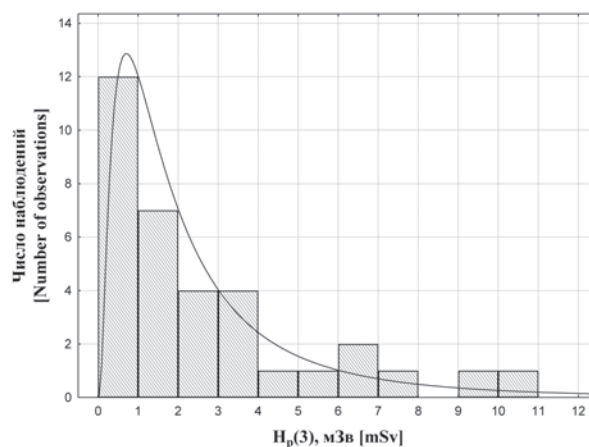


Рис. 1. Распределение годовых значений индивидуального эквивалента дозы $H_p(3)$ (измерения 2016–2018 гг.)

[Fig. 1. Distribution of annual values of individual dose equivalent $H_p(3)$ (data for 2016–2018)]

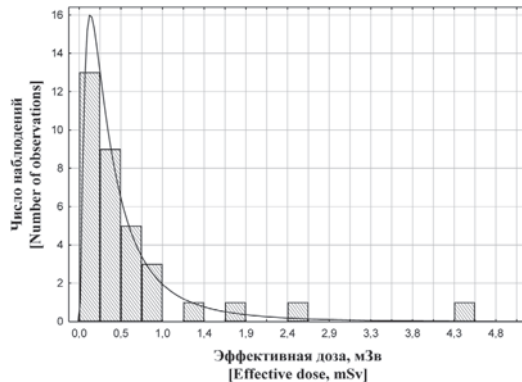


Рис. 2. Распределение годовых эффективных доз (измерения 2016–2018 гг.)
[Fig.2. Distribution of annual effective doses (data for 2016–2018)]

Результаты оценки эффективной дозы на основе данных ИДК говорят о том, что вероятность превышения 3/10 значения предела дозы (6 мЗв) практически равна нулю. Согласно Европейской директиве [14], в этом случае проведение ИДК не обязательно. В настоящее время в российском законодательстве в области радиационной безопасности такой нормы нет.

Результаты оценки значений эквивалентной дозы хрусталиков глаз свидетельствуют, что в случае старого значения дозового предела (150 мЗв) вероятность его превышения практически равна нулю, да и значение нового предела (20 мЗв), согласно данным измерений, может быть превышено менее чем в 1% случаев. Тем не менее, вероятность превышения 3/10 значения предела дозы существует у 10% операторов и, по крайней мере, согласно Европейской директиве [14], проведение ИДК для этой категории медицинского персонала обязательно.

Надо отметить, что результаты наших измерений значений $H_p(3)$ существенно отличаются от аналогичных результатов, полученных в рамках Европейского проекта ORAMED (Optimization of Radiation Protection of Medical Staff) [5]. Там на основании измерения доз для отдельных медицинских процедур и количества процедур за год, выполняемых оператором, предсказывается, что вероятность превышения 3/10 значения нового предела годовой дозы для хрусталиков глаз возможна у 45% операторов, а предела годовой дозы – у 24%.

Выше говорилось, что в настоящее время для оценки эффективной дозы персонала рентгенохирургических бригад используются два индивидуальных дозиметра: один расположен под защитным фартуком, другой – над ним. Согласно результатам опроса представителей европейских учреждений, осуществляющих ИДК персонала, рекомендовалось, даже с учетом введения нового дозового предела для эквивалентной дозы в хрусталиках глаз 20 мЗв, использовать для оценки дозы в них показания уже существующего дозиметра, расположенного над фартуком, если его показания существенно меньше дозового предела. Эти рекомендации, основанные на результатах ИДК [15] и расчетах методом Монте-Карло [9], позволяли не носить дополнительный индивидуальный дозиметр, что упрощало и удешевляло проведение ИДК. Однако при этом указывалось, что при приближении по-

казаний этого дозиметра к значению дозового предела из-за существенного разброса отношения $H_p(3)/H_p(10)$ все-таки необходим дополнительный дозиметр, расположенный вблизи глаз оператора. Попытаемся на основании результатов собственных измерений оценить необходимость ношения такого дополнительного дозиметра.

Анализ полученных на основании измерений результатов отношения $H_p(3)/H_p(10)$ при размещении дозиметра, измеряющего $H_p(10)$ над защитным фартуком (на воротнике халата или на груди), показывает, что распределение этого отношения статистически достоверно (согласно критерию Стьюдента, $p > 0,05$) подчиняется нормальному закону распределения (рис. 3). Среднее значение отношения $H_p(3)/H_p(10)$ оказалось равным 1,11 ($\pm 0,66$ ст. откл.), что почти в 1,5 раза выше, чем аналогичное значение (0,75), рекомендованное на основании результатов исследований проекта ORAMED для нижнего расположения рентгеновской трубки [5]. При этом 90% значений отношения $H_p(3)/H_p(10)$, полученного в настоящей работе, лежит в пределах 0,024–2,2, а 50% – в пределах 0,66–1,55. Согласно данным европейских исследований [15], для интервенционных медицинских процедур разброс значений этого отношения на основании данных ИДК составлял 0,44–1,45. На основании фантомных экспериментов разброс значений этого отношения составлял 0,74–1,77 [16]. При этом отмечалось, что отношение $H_p(3)/H_p(10)$ было больше единицы при верхнем расположении рентгеновской трубки или когда не использовались верхние навесные защитные шторы.

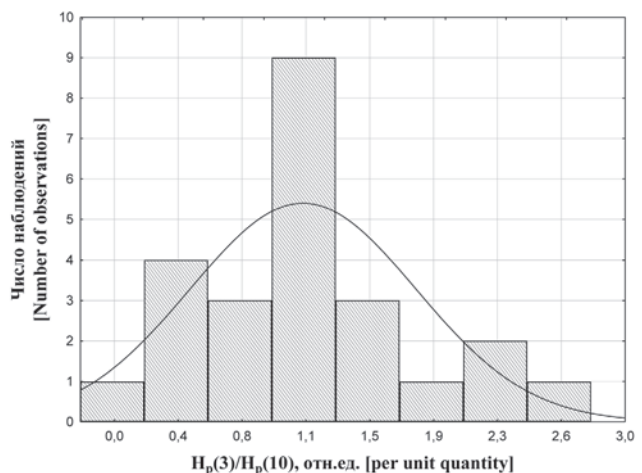


Рис. 3. Распределение отношения $H_p(3)/H_p(10)$ (измерения 2016–2018 гг.)
[Fig.3. Ratios $H_p(3)/H_p(10)$ (data for 2016–2018)]

Основываясь на собственных полученных параметрах распределения отношения $H_p(3)/H_p(10)$, можно оценить, с какой вероятностью $H_p(3)$ превысит значение 20 мЗв в зависимости от значения $H_p(10)$, которое измеряется в настоящее время в области шеи, над фартуком у членов рентгенохирургических бригад.

Обозначим:

$$\frac{H_p(3)}{H_p(10)} = k \text{ или } H_p(3) = k \cdot H_p(10), \quad (2)$$

Далее, зная параметры распределений величин k и $H_p(10)$, оценим, при каком значении $H_p(10)$ возможно, что $H_p(3)$ превысит значение нового дозового предела 20 мЗв и какова вероятность этого события.

90% интервал значений $H_p(3)/H_p(10)$, оцененный по результатам измерений, составляет 0,024–2,2. На его нижней границе для того, чтобы $H_p(3)$ было больше 20 мЗв, значение $H_p(10)$ должно быть больше 830 мЗв, вероятность чего практически равна нулю. На верхней границе этого интервала $H_p(3)$ будет больше 20 мЗв, если значение $H_p(10)$ будет больше 9,1 мЗв, вероятность чего $P(H_p(10) \geq 9,1 \text{ мЗв}) = 0,066$. Таким образом, полная накопленная вероятность того, что $9,1 \text{ мЗв} \leq H_p(10) \leq 830 \text{ мЗв}$, будет равна 0,066. Далее методом стохастического моделирования с помощью программы Crystal Ball [17] построили распределение произведения $k \cdot H_p(10)$: k – ограниченное нормальное распределение на интервале 0,024–2,2; $H_p(10)$ – ограниченное логнормальное распределение на интервале 9,1–830. Оказалось, что для распределения произведения $k \cdot H_p(10)$ вероятность превышения значения 20 мЗв составляет 30%. Иными словами, при зарегистрированном годовом значении $H_p(10) > 9,1 \text{ мЗв}$ вероятность, что $H_p(3) > 20 \text{ мЗв}$, будет равна $0,9 \cdot 0,3 = 0,27 = 27\%$. Для всей выборки значений $H_p(10)$ вероятность, что $H_p(3) > 20 \text{ мЗв}$, будет равна $0,9 \cdot 0,066 \cdot 0,3 = 0,018 = 1,8\%$.

Таким образом, используя результаты представленных здесь измерений, можно предложить следующий критерий введения дополнительного дозиметра для оценки эквивалентной дозы в хрусталиках глаз при работе на аппаратах с расположением трубки под декой стола. При существующей системе измерений индивидуальных доз у членов рентгенохирургических бригад с ношением двух дозиметров (один – над фартуком в районе щитовидной железы, другой – под фартуком на груди) введение дополнительного третьего дозиметра, расположенного вблизи глаз оператора, возможно, если годовое значение дозы, зарегистрированной дозиметром, расположенным над фартуком в районе щитовидной железы, будет более чем 9 мЗв.

Заключение

Проведенные измерения показывают, что вероятность превышения годовых доз облучения хрусталиков глаз у персонала рентгенохирургических бригад значения нового годового предела дозы 20 мЗв мала – около 1%. Превышение же существующего в настоящее время дозового предела эквивалентной дозы облучения хрусталика глаза (150 мЗв) вообще вряд ли возможно в нормальных условиях.

Наилучшим решением для оценки дозы облучения хрусталика глаза является измерение индивидуального эквивалента дозы $H_p(3)$ с помощью соответствующим образом откалиброванного ТЛ-дозиметра, расположенного вблизи глаз работника. Однако этот дополнительный дозиметр необходим только в случае, когда значение эквивалентной дозы облучения хрусталика глаза приближается к новому пределу 20 мЗв. По результатам проведенного исследования введение такого дополнительного дозиметра возможно, если годовое значение показаний дозиметра, расположенного над фартуком в районе щитовидной железы, больше, чем 9 мЗв.

Литература

1. Summary of Low-Dose Radiation Effects on Health. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR 2010). – May 2011; p. 51–64.
2. ICRP (2012). ICRP Statement on tissue reactions/early and late effects of radiation in normal tissues and organs threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. Publication 118 ICRP 41: (1/2).
3. Международное Агентство по Атомной Энергии. Радиационная Защита и Безопасность Источников Излучения: Международные Основные Нормы Безопасности. Общие требования безопасности. Серия норм МАГАТЭ по безопасности, № GSR Part 3. – Вена: МАГАТЭ, 2015. – 518 с.
4. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ) / Пер с англ.; под общей ред. М.Ф. Киселёва и Н.К. Шандалы. – М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. – 344 с.
5. ORAMED: Optimization of Radiation Protection of Medical Staff: EURADOS Report 2012-02, – Braunschweig, April 2012.
6. Radiation Protection of Patients (RPOP) – the leading resource for health professionals, patients and public on the safe and effective use of radiation in medicine: <https://www.iaea.org/resources/rpop/health-professionals/interventional-procedures/interventional-cardiology/staff> (дата обращения: 13.03.2019 г.)
7. ICRP, 2018. Occupational radiological protection in interventional procedures. ICRP Publication 139. Ann. ICRP 47(2).
8. ICRP (2000). Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedures Publication 85 30:(2) (Oxford: Pergamon).
9. Clerinx P, Buls N, Bosmans H, and de Mey J. (2008) Double-dosimetry algorithm for workers in interventional radiology. Radiat. Prot. Dosim., 129, pp. 321–327.
10. Martin C. J, and Magee J. S. (2013) Assessment of eye and body dose for interventional radiologists, cardiologists, and other interventional staff. J. Radiol. Prot., 33, pp. 445–460.
11. Marie Claire Cantone [et al.] Report of IRPA task group on the impact of the eye lens dose limits. J. Radiol. Prot., 2017, 37, 527 p.
12. Шлеенкова, Е.Н. Результаты индивидуального дозиметрического контроля персонала медицинских организаций / Е.Н. Шлеенкова // Радиационная гигиена. – 2014. – Т. 7, № 3. – с. 39–43.
13. Системы рентгеновские ангиографические GE: Innova 2100-IQ, Innova 2121-IQ, Innova 3131-IQ, Innova 4100-IQ, Innova 3100-IQ. В разделе «рентгеновское оборудование» сайта: medimp.com (дата обращения: 10.05.2019 г.)
14. European Commission 2014 Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 Laying down Basic Safety Standards for Protection against the Dangers Arising from Exposure to Ionising Radiation, and Repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom 13 1–73.
15. Eye lens monitoring for interventional radiology personnel: dosimeters, calibration and practical aspects of $H_p(3)$ monitoring. A 2015 review, Journal of Radiological Protection, 35(2015), R17–R34.
16. Farah J, Struelens L, Dabin J, Koukorava C, Donadille L, Jacob S, Schnelzer M, Auvinen A, Vanhavere F and Clairand I. (2013) A correlation study of eye lens dose and personal dose equivalent for interventional cardiologists Radiat. Prot. Dosim., 157, pp. 561–569.
17. Official site Oracle Crystal Ball: <http://www.oracle.com/crystalball> (дата обращения: 12.08.2019 г.)

Поступила: 13.06.2019 г.

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

Голиков Владислав Юрьевич – старший 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: sg235@rambler.ru

Кайдановский Георгий Наумович – исполняющий обязанности ведущего научного сотрудника лаборатории радиационного контроля Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Бажин Степан Юрьевич – исполняющий обязанности заведующего лабораторией радиационного контроля – старший научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

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

Для цитирования: Шлеенкова Е.Н., Голиков В.Ю., Кайдановский Г.Н., Бажин С.Ю., Ильин В.А. Результаты контроля доз облучения хрусталиков глаз у медицинского персонала г. Санкт-Петербурга // Радиационная гигиена. – 2019. – Т. 12, № 4. – С. 29–36. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-29-36

Results of eye lens doses control of medical personnel in St. Petersburg

Ekaterina N. Shleenkova, Vladislav Yu. Golikov, Georgy N. Kaidanovsky, Stepan Yu. Bazhin, Vladimir A. Ilyin

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

Results of individual monitoring for personnel of X-ray surgical teams in several clinics of St. Petersburg are presented and analyzed. Measurements of the operational quantities – individual dose equivalents $H_p(3)$ and $H_p(10)$ were performed by thermoluminescent dosimetry method. Dosimeters designed to measure $H_p(3)$ were located in the operators forehead area, and to determine $H_p(10)$ both above the operator's individual protective apron in the collar or chest area and under the protective apron in the chest area. The results of 34 measurements of the annual values of $H_p(3)$ and $H_p(10)$ measured above the apron and 24 values of $H_p(10)$ measured below the apron were processed and analyzed. The results after the statistical treatment show that the probability of exceeding the annual values of $H_p(3)$ in the personnel of X-ray surgical teams of the new dose limit 20 mSv is small, less than 1%. Exceeding the current dose limit of the equivalent exposure dose of the lens of the eye (150 mSv) is hardly possible at all under normal conditions. The best solution for evaluating the radiation dose of the lens of the eye is to measure the individual equivalent of the dose $H_p(3)$, using a suitably calibrated TL-dosimeter (thermoluminescent dosimeter) located near the worker's eyes. However, this additional dosimeter is only necessary when the values of eye lens equivalent dose can approach the new value of dose limit of 20 mSv. According to the results of the study, it is possible to introduce such an additional dosimeter if the annual value of $H_p(10)$ recorded by the dosimeter located above the protective apron is more than 10 mSv.

Key words: individual dose monitoring, eye lens equivalent dose, individual dose equivalent.

Vladislav Yu. Golikov

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

Address for correspondence: Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101; E-mail: sg235@rambler.ru

References

- Summary of Low-Dose Radiation Effects on Health. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR 2010). May 2011; pp. 51-64.
- ICRP (2012). ICRP Statement on tissue reactions/early and late effects of radiation in normal tissues and organs threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. Publication 118 ICRP 41: (1/2).
- International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. GSR Part 3. Vienna: IAEA, 2015, 518 p. (in Russian)
- ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4). (In Russian)
- ORAMED: Optimization of Radiation Protection of Medical Staff: EURADOS Report 2012-02, Braunschweig, April 2012.
- Radiation Protection of Patients (RPOP) – the leading resource for health professionals, patients and public on the safe and effective use of radiation in medicine. – Available on: <https://www.iaea.org/resources/rpop/health-professionals/interventional-procedures/interventional-cardiology/staff> (Accessed: 13.03.2019)
- ICRP, 2018. Occupational radiological protection in interventional procedures. ICRP Publication 139. Ann. ICRP 47(2).
- ICRP (2000). Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedures Publication 85 30:(2) (Oxford: Pergamon).
- Clerinx P, Buls N, Bosmans H, and de Mey J. (2008) Double-dosimetry algorithm for workers in interventional radiology. Radiat. Prot. Dosim., 129, pp. 321–327.
- Martin C.J., and Magee J.S. (2013) Assessment of eye and body dose for interventional radiologists, cardiologists, and other interventional staff. J. Radiol. Prot., 33, pp. 445–460.
- Marie Claire Cantone et al. (2017) Report of IRPA task group on the impact of the eye lens dose limits. J. Radiol. Prot., 37, 527p.
- Shleenkova E.N. The results of individual dose control of health institutions staff. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene, 2014, Vol.7, № 3, pp. 39-43. (In Russian)
- X-ray angiographic systems GE: Innova 2100-IQ, Innova 2121-IQ, Innova 3131-IQ, Innova 4100-IQ, Innova 3100-IQ. – Available on: medimp.com (Accessed: 10.05.2019) (In Russian)
- European Commission 2014 Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 Laying down Basic Safety Standards for Protection against the Dangers Arising from Exposure to Ionising Radiation, and Repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom 13 1–73.
- Eye lens monitoring for interventional radiology personnel: dosimeters, calibration and practical aspects of Hp(3) monitoring. A 2015 review, Journal of Radiological Protection, 35(2015), R17–R34.
- Farah J, Struelens L, Dabin J, Koukorava C, Donadille L, Jacob S, Schnelzer M, Auvinen A, Vanhavere F and Clairand I. (2013) A correlation study of eye lens dose and personal dose equivalent for interventional cardiologists Radiat. Prot. Dosim., 157, pp. 561–569.
- Official site Oracle Crystal Ball. – Available on: <http://www.oracle.com/crystalball> (Accessed: 12.08.2019)

Received: June 13, 2019

Ekaterina N. Shleenkova– Junior Researcher, Laboratory of radiation control, 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

For correspondence: Vladislav Yu. Golikov – Senior Researcher of the Medical Protection Laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: sg235@rambler.ru)

Georgy N. Kaidanovsky – acting leading researcher of the laboratory of radiation control, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

Stepan Yu. Bazhin – acting head of radiation control laboratory – senior researcher, 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

Vladimir A. Ilyin – technician-researcher at the laboratory of radiation control, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

For citation: Shleenkova E.N., Golikov V.Yu., Kaidanovsky G.N., Bazhin S.Yu., Ilyin V.A. Results of eye lens doses control of medical personnel in St. Petersburg. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene, 2019, Vol. 12, No. 4, pp. 29-36. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-29-36

Корреляция между расчетными и измеренными значениями мощности дозы гамма-излучения в воздухе в лесах, загрязненных ^{137}Cs : отдаленный период после Чернобыльской 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

В 2015–2016 гг. было обследовано 13 лесных и 7 целинных луговых участков, расположенных на территории юго-западных районов Брянской области. Целью работы являлась экспериментальная проверка возможности использования метода расчета мощности дозы гамма-излучения в воздухе в радиоактивно загрязненных лесах на отдаленном этапе после Чернобыльской аварии. По результатам гамма-спектрометрического анализа проб почвы, отобранных на участках, были установлены и опубликованы значения запаса и вертикального распределения ^{137}Cs в верхнем 20-сантиметровом слое. Эти данные были использованы для вычисления мощности воздушной кермы с применением метода, заимствованного из литературы. Кроме того, в местах отбора проб почвы была измерена мощность AMBIENTного эквивалента дозы гамма-излучения в воздухе, и с помощью полевого гамма-спектрометра-дозиметра был определен вклад ^{137}Cs в общую мощность дозы. Измеренные значения мощности AMBIENTного эквивалента дозы от ^{137}Cs положительно и статистически значимо коррелировали с расчетными значениями мощности воздушной кермы. Коэффициент корреляции Спирмена был равен 0,989 ($P < 0,01$) для локации «Лес» и 0,893 ($P < 0,05$) для локации «Луг». Статистически значимых различий между локациями «Лес» и «Луг» при анализе соотношения измеренных и расчетных значений мощности дозы выявлено не было (тест Манна – Уитни, $P > 0,05$). Результаты настоящей работы показывают, что при вычислении мощности дозы гамма-излучения в воздухе в лесу на отдаленном этапе после Чернобыльской аварии достаточно знать величину запаса ^{137}Cs в верхнем 20-сантиметровом слое почвы и подробную картину вертикального распределения радионуклида в этом слое. Присутствием древесной биомассы можно пренебречь. Такая оценка мощности дозы является консервативной. Однако степень завышения мощности дозы в воздухе будет невелика – в пределах +10%, что вполне приемлемо для определения дозы внешнего облучения человека при его нахождении в радиоактивно загрязненном лесу.

Ключевые слова: лес, луг, почва, ^{137}Cs , воздушная керма, AMBIENTный эквивалент дозы.

Введение

В результате Чернобыльской аварии существенному загрязнению радионуклидами цезия (^{137}Cs и ^{134}Cs) подверглись весьма обширные лесные территории Европы [1]. В начальный период времени после выпадений значительная часть радиоцезия в лесах была связана с надземной биомассой древесных растений [1, 2]. В хвойных лесах до 90% выпавших радионуклидов изначально могло удерживаться кроной деревьев [1, 3, 4]. Остальная часть радионуклидов выпадала непосредственно на почву и подлесок. Сходное распределение радиоактивного цезия в лесах Японии было отмечено после Фукусимской аварии [5, 6]. Такую сложную геометрию источника излучения необходимо учитывать при его моделировании для оценки дозы внешнего облучения человека в случае его пребывания в радиоактивно загрязненном лесу [7].

Со временем в лесных экосистемах проходит существенное перераспределение активности в пользу почвы [1, 3], которая в отдаленный период времени (годы – десятилетия) после выпадений является основным источником гамма-излучения в загрязненном лесу [7, 8]. По разным оценкам, надземная биомасса деревьев может содержать от 2 до 20% общего запаса радиоцезия в лесной экосистеме [1, 3, 9, 10]. Экспериментальным и расчетным путем установлено, что радиоцезий, находящийся в надземной части древесных растений, в этот период дает крайне незначительный вклад в общий поток гамма-квантов в воздухе – в пределах нескольких процентов [8, 11]. Вместе с тем, с помощью модельных расчетов показано, что в общем случае надземная биомасса деревьев ослабляет и рассеивает поток гамма-квантов от источника, находящегося в почве [7, 8, 12]. Выраженность

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

этого эффекта зависит не только от плотности биомассы, но и от глубины залегания источника гамма-излучения в почве.

Отчетливое доминирование радиоцезия, находящегося в почве, в формировании гамма-поля излучения в воздухе в лесу на отдаленном этапе после выпадений теоретически позволяют использовать упрощенную модель для вычисления мощности дозы в воздухе. При этом расчет может вестись тем же методом, что и для условий открытой местности (луг, поле), т.е. лишь на основе знаний о вертикальном распределении радионуклидов в почве [13].

Цель исследования – экспериментальная проверка возможности использования одного из опубликованных методов расчета мощности дозы гамма-излучения в воздухе в радиоактивно загрязненных лесах спустя 30 лет после Чернобыльской аварии.

Задачи исследования:

– вычислить мощность кермы в воздухе на открытой местности (целинные луга) и в лесах, используя опубли-

кованные экспериментальные данные о вертикальном распределении ^{137}Cs в почве;

– с помощью полевого гамма-спектрометра-дозиметра измерить мощность AMBIENTного эквивалента дозы гамма-излучения в воздухе в местах отбора проб почвы;

– оценить вклад природной и техногенной компоненты в мощность AMBIENTного эквивалента дозы;

– определить соотношения между расчетным значением мощности воздушной кермы и измеренным значением мощности AMBIENTного эквивалента дозы гамма-излучения ^{137}Cs на открытой местности и в лесу.

Материалы и методы

Места обследования

Места обследования расположены в Брянской области России, в Новозыбковском, Клинцовском, Злынковском и Краснотуровском районах, наиболее загрязненных в результате Чернобыльской аварии. Географические координаты и условные названия 13 лесных и 7 луговых площадок приведены в таблице 1. Там же даны даты обследования.

Таблица 1

Средняя глубина миграции ^{137}Cs в почве (Z_{Cs}), запас ^{137}Cs в почве (A_{Cs}), суммарная мощность AMBIENTного эквивалента дозы ($\text{ADER}_{\text{reading}}$) и мощность AMBIENTного эквивалента дозы от терригенных радионуклидов (ADER_{TRN}) на луговых и лесных участках, обследованных в Брянской области в 2015–2016 гг.

[Table 1]

^{137}Cs mean migration depth in soil (Z_{Cs}), ^{137}Cs inventory in soil (A_{Cs}), total ambient dose equivalent rate ($\text{ADER}_{\text{reading}}$) and the ambient dose equivalent rate due to terrestrial radionuclides (ADER_{TRN}) at the forest and meadow plots surveyed in the Bryansk region in 2015–2016]

Дата [Date]	Код участка [Code of plot]	Географические координаты [Geographic coordinates]		Z _{Cs} (г/см ² , в.в.)* [Z _{Cs} (g/cm ² , w.w.)*]	A _{Cs} (кБк/м ²)* [A _{Cs} (kBq/m ²)*]	ADER _{reading} (нЗв/ч) [ADER _{reading} (nSv/h)]	ADER _{TRN} (нЗв/ч) [ADER _{TRN} (nSv/h)]
		° с.ш. [Latitude, °N]	° в.д. [Longitude, °E]				
Лес [Forest]							
17.08.2015	Zab-f-1	53,09012	31,72160	2,83	1940	2730	23
17.08.2015	Zab-f-2	53,08391	31,69261	2,73	1350	2330	28
18.08.2015	Yal-fo	52,87696	31,63991	2,05	392	644	23
18.08.2015	NB-f-b	52,65158	31,74611	2,77	776	950	28
19.08.2015	Bab-fo	52,63519	31,60459	4,36	937	1570	21
19.08.2015	Gri-fo	52,58749	31,76524	2,58	506	764	22
20.08.2015	Kho-fo	52,42519	32,22504	3,96	185	251	15
20.08.2015	Dem-f-p	52,49791	31,87156	4,26	420	669	15
21.08.2015	Vep-f-C	52,68639	31,94329	2,76	515	922	21
22.08.2015	Mur-f-ol	52,47046	31,78855	2,52	693	1020	19
23.08.2015	Pes-f-1	52,87385	32,20709	3,47	42.4	87	17
23.08.2015	Pes-f-2	52,88914	32,19037	2,83	50.9	102	19
25.08.2015	Mam-fo	52,49920	32,00962	6,35	446	461	27
Луг [Grassland]							
24.08.2015	Mur-1	52,48168	31,78533	2,48	685	1050	20
24.08.2015	Dem-Ind	52,49743	31,88307	2,98	596	833	22
24.08.2015	Vep-Ush	52,71290	31,89801	5,11	628	708	22
25.08.2015	Mur-2	52,48188	31,78535	2,46	681	1050	20
13.06.2016	Bab-Gol	52,64270	31,59573	7,93	1240	1230	26
13.06.2016	Bab-Hig	52,63822	31,60305	2,20	1300	1800	29
03.08.2016	Bab-wel	52,64295	31,59535	7,04	1080	1120	28

* – приводится по данным работы [17].

[* – as reported in [17].]

На 11 лесных площадках доминирующим видом деревьев была сосна. В 2 случаях лес был смешанным – сосна и береза (участки Dem-f-p и Mam-fo). Возраст деревьев, в основном, находился в диапазоне от 40 до 70 лет. Луговые целинные площадки не подвергались перепашке после Чернобыльской аварии. Почвенный покров представлен легкими дерново-подзолистыми песчаными и супесчаными почвами. На всех лугах травяной покров был весьма развит, в особенности на участках Bab-Hig и Dem-Ind. На площадке Mur-1, помимо травянистых растений, присутствовала молодая поросль сосны (самосев). На 2 лесных площадках (Dem-f-p и Mam-fo) поверхность почвы отличалась регулярной волнистостью, что было связано с технологией посадки саженцев деревьев в прошлом (до аварии).

Полевые измерения и обработка гамма-спектров

Работы проводили на горизонтальных площадках размером примерно 10×10 м. На этапе выбора площадок были выполнены предварительные измерения пространственного распределения мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (ADER) на высоте 1 м. Для этого использовали дозиметр ДКС АТ-1121 (Атомтех, Беларусь). Измерения проводили в 7 точках: 1 точка в центре площадки, 3 точки в вершинах равнобедренного треугольника со стороной 2 м и 3 точки в вершинах равнобедренного треугольника со стороной 7,5 м (схема представлена в [14]). Статистическая ошибка одного измерения ADER была менее 10% (95% вероятность). Различия между максимальным и минимальным значением ADER в пределах площадки не превышали 30% и в среднем равнялись 15% (лес) и 13% (луг). Коэффициент вариации (отношение стандартного отклонения к средней величине) значений ADER был низким – в пределах 9% (в среднем 4,9% в лесу и 4,6% на лугу). Отмеченная вариабельность в значительной мере была связана со статистической погрешностью индивидуальных измерений.

Основные измерения ADER и запись полевых спектров проводили в центре площадок с использованием портативного гамма-спектрометра-дозиметра МКС АТ-6101Д (Атомтех, Беларусь). Спектрометр размещали на алюминиевом треножнике на высоте 1 м над поверхностью земли (подробное описание и иллюстрации приведены в [15, 16]). В лесу треногу устанавливали на расстоянии более 2 м от ближайшего дерева. Продолжительность набора спектров находилась в диапазоне от 720 с до 4460 с (средняя = 2500 с). При такой продолжительности экспозиции статистическая погрешность измерений общей мощности амбиентного эквивалента дозы ($ADER_{reading}$) не превышала 2% (95% вероятность).

Обработку полевых (*in situ*) спектров и раздельное определение техногенного ($ADER_{Cs-tot}$ от источника ^{137}Cs – ^{137m}Ba) и природного ($ADER_{TRN}$ от терригенных радионуклидов) компонентов ADER проводили в соответствии с методом, изложенным в [15]. Вычисление мощности дозы ($ADER_{Cs-prim}$), определяемой первичными, т.е. нерассеянными гамма-квантами ^{137}Cs , проводили по методике, приведенной в [16]. Статистическая погрешность вычисления $ADER_{Cs-tot}$ и $ADER_{Cs-prim}$ в среднем не превышала 2%; для $ADER_{TRN}$ эта погрешность находилась в диапазоне от 6 до 16%, при среднем значении 11%. На основе полученных значений $ADER_{Cs-prim}$ и $ADER_{Cs-tot}$ был рассчитан дозо-

вый фактор накопления (BUF_{Cs} , безразмерная величина), который равен отношению $ADER_{Cs-tot}$ в точке детектирования к $ADER_{Cs-prim}$ в той же точке. Величина фактора накопления, с одной стороны, отражает ослабляющие свойства окружающей среды в отношении первичных фотонов, а с другой – позволяет говорить о степени уменьшения средней энергии поля фотонов по сравнению с энергией первичных фотонов. Ранее результаты определения ADER на 17 площадках, обследованных в 2015 г., были использованы для оценки влияния присутствия оператора на значение ADER [16]. Поэтому в настоящем исследовании численные данные по ADER для этих площадок приводятся в соответствии с приложением 2 к работе [16].

Исходные данные по распределению ^{137}Cs в почве

Исходные данные по распределению ^{137}Cs в почве для вычисления мощности воздушной кермы (KR_{Cs}) на обследованных участках были взяты из работы [17]. В этом исследовании отбор проб почвы до глубины 20 см проводили в 7 точках, выбранных на этапе предварительной оценки ADER. Керны почвы были разрезаны на горизонтальные слои толщиной по 2 см. По результатам взвешивания была определена глубина пробоотбора в терминах массовой толщины ($г/см^2$, влажный вес) для отдельных слоев и керна в целом. Массовая толщина всего керна варьировала от 26,7 до 31,5 $г/см^2$ и в среднем равнялась 29,3 $г/см^2$ в лесу и 29,8 $г/см^2$ на лугу. Влажность почвы была крайне низкой – в среднем около 4%, т.к. во всех случаях отбор проб был проведен в засушливый период. Удельная активность ^{137}Cs в пробах сухой почвы ($n = 200$) варьировала от 6,35 Бк/кг до 83 300 Бк/кг при среднем значении 4550 Бк/кг. Для вычисления KR_{Cs} значения удельной активности ^{137}Cs в каждой пробе, приведенные по сухому весу в работе [17], были пересчитаны на сырой (исходный) вес с использованием показателя содержания влаги в соответствующей пробе. Общий запас ^{137}Cs в 20-сантиметровом слое почвы (A_{Cs}) находился в диапазоне от 42 до 1940 кБк/м² (см. табл. 1). И в лесу, и на лугу верхние 5 слоев почвы (глубина 0–10 см) в среднем содержали около 94% запаса ^{137}Cs . Средняя глубина миграции ^{137}Cs в почве была небольшой для столь отдаленного периода времени после выпадений – около 3,3 $г/см^2$ в лесу и 4,3 $г/см^2$ на лугу (см. табл. 1).

Расчет мощности воздушной кермы от ^{137}Cs в почве

При расчете мощности кермы в воздухе (KR_{Cs-tot}) на высоте 1 м над поверхностью земли от источника ^{137}Cs в почве мы использовали метод, разработанный Golikov et al. [7] специально для лесной экосистемы. В соответствии с моделью [7] предполагалось, что в пределах каждого слоя почвы активность ^{137}Cs распределена равномерно. Сам слой представлял собой горизонтальный плоский источник. В расчетах Golikov et al. [7] был использован следующий элементный состав почвы: Si – 26,2%, Al – 8,5%, Fe – 5,6%, H – 2,2%, O – 57,5%. Учитывалось и присутствие надземной древесной биомассы, состоящей на 27% из C, на 63,9% – из O, на 8,6% – из H, на 0,13% – из Ca и на 0,18% – из других химических элементов. Выведенная Golikov et al. [7] формула для расчета воздушной кермы имеет вид:

$$KR_{Cs-tot} = 3.6 \times \sum_i X_i \times \left\{ \frac{a_1}{a_3} \times \exp((a_4 - a_2) \times p) \times \exp(-a_3 \times \exp(-a_4 \times p) \times z_{i-1}) \times [1 - \exp(-a_3 \times \exp(-a_4 \times p) \times (z_i - z_{i-1}))] + \frac{a_5}{a_6} \times \exp(-a_6 \times z_{i-1}) \times [1 - \exp(-a_6 \times (z_i - z_{i-1}))] \right\} \quad (3)$$

где KR_{Cs-tot} – мощность кермы (нГр/ч) в воздухе на высоте 1 м над поверхностью земли;

X_i – удельная активность (Бк/г, на влажный вес) ^{137}Cs в i -м слое почвы;

z_i – массовая глубина (г/см²) нижней границы i -го слоя почвы;

p – плотность надземной биомассы в лесу (кг/м³);

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ – эмпирические безразмерные коэффициенты, равные 3,39, 0,094, 0,492, 0,051, 2,38, 0,0723 соответственно.

Данная модель и метод вычисления могут быть применены для определения мощности кермы в воздухе не только для лесных, но и для открытых земляных площадок. В этом случае для луговых площадок (и лесных площадок в предположении отсутствия надземной древесной биомассы) значение p принимается равным 0. Ранее данная модель и метод расчета были верифицированы для открытой местности в Брянской области с использованием альтернативного метода вычислений [18] и результатов непосредственных измерений мощности поглощенной дозы в воздухе [19].

Статистический анализ

Статистическая обработка результатов измерений и расчетов включала в себя вычисление медианы, средней, стандартного отклонения. Различия между группами оценивали с использованием непараметрического критерия Манна – Уитни. Различия считали статистически значимыми при $P < 0,05$. Взаимосвязи между показателями исследовали с помощью непараметрического коэффициента ранговой корреляции Спирмена (R_{sp}).

Результаты и обсуждение

Измеренная мощность амбиентного эквивалента дозы

Измеренные значения мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения ($ADER_{reading}$) находились в диапазоне от 87 до 2730 нЗв/ч (см. табл. 1). Между $ADER_{reading}$ и A_{Cs} (см. табл. 1) наблюдалась довольно жесткая положительная взаимосвязь (рис. 1). Коэффициент корреляции R_{sp} был равен 0,978 ($P < 0,01$) в лесу и 0,964 ($P < 0,01$) на лугу.

Мощность дозы, обусловленная терригенными радионуклидами ($ADER_{TRN}$), варьировала от 15 до 29 нЗв/ч (см. табл. 1). Вклад терригенных радионуклидов в значения $ADER_{reading}$ и в лесу, и на лугу был незначительным – в среднем около 3%. Результаты измерения $ADER_{Cs-prim}$ и $ADER_{Cs-tot}$ приведены в таблице 2. Вклад нерассеянных гамма-квантов ^{137}Cs в общую измеренную мощность амбиентного эквивалента дозы от ^{137}Cs ($ADER_{Cs-tot}$) в лесу и на лугу был примерно одинаков: в среднем 54% и 52% соответственно. Медианные значения в обоих случаях были равны 55%. Соответственно, не было различий ($P > 0,05$) между локациями и по показателю

дозового фактора накопления BUF_{Cs} . Отсутствие различий между локациями в отношении BUF_{Cs} позволяет говорить о том, что в первом приближении средняя энергия фотонов в спектрах гамма-излучения в лесу и на лугу одинаковы.

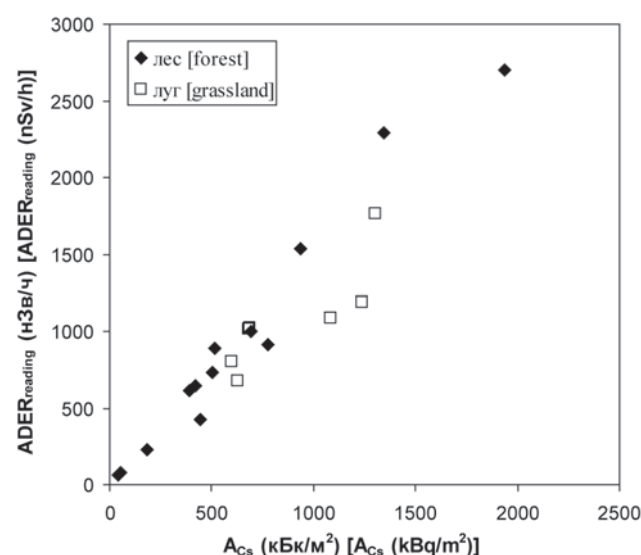


Рис. 1. Соотношение между экспериментально установленным [17] запасом ^{137}Cs в верхних 20 см почвы (A_{Cs}) и измеренной мощностью амбиентного эквивалента дозы ($ADER_{reading}$) на 13 лесных и 7 луговых площадках, обследованных в Брянской области в 2015–2016 гг.

[Fig. 1.] Relationship between experimentally determined [17] ^{137}Cs inventory in the top 20 cm of soil (A_{Cs}) and measured ambient dose equivalent rate ($ADER_{reading}$) at 13 forest and 7 grassland plots surveyed in the Bryansk region in 2015–2016]

Мощность воздушной кермы в отсутствие надземной биомассы

Вначале расчет мощности воздушной кермы от содержащегося в почве ^{137}Cs был проведен для условий, когда над поверхностью почвы биомасса отсутствовала. Результаты вычисления представлены в таблице 2. Значения KR_{Cs-tot} находились в диапазоне от 52 до 2300 нГр/ч. Для сухой почвы вычисленные значения мощности воздушной кермы были в среднем на 3% больше, чем таковые для влажной почвы.

В лесу в среднем около 84% KR_{Cs-tot} определялось запасом ^{137}Cs , содержавшимся в верхнем 4-сантиметровом слое почвы. Почти 99% KR_{Cs-tot} было ассоциировано с ^{137}Cs , распределенным в верхних 10 см. На лугу эти показатели были несколько меньшими – 76% и 98% соответственно.

Влияние древесной биомассы на мощность кермы в воздухе

Для определения влияния древесной растительности на результирующую мощность воздушной кермы в лесу мы выбрали значения плотности биомассы (p), равные 1, 2 и 4 кг/м³. Значения 1 и 2 кг/м³ использовались в расчетах в работе Golikov et al. [7], хотя плотность биомассы могла в исключительных случаях достигать величины 5 кг/м³. Кроме того, мы учли тот факт, что экспериментально установленные значения плотности биомассы в лесах [8] находились в диапазонах 1–2 кг/м³ на территории Брянской области и 2–4 кг/м³ на загрязненной территории Украины.

Таблица 2

Измеренная (на основе результатов гамма-спектрометрии *in situ*) мощность амбиентного эквивалента дозы в воздухе ($ADER_{Cs}$) и рассчитанная (на основе результатов анализа проб почвы *ex situ*) мощность кермы в воздухе (KR_{Cs}) от ^{137}Cs на лесных и луговых участках, обследованных в Брянской области в 2015–2016 гг.

[Table 2]

Measured (based on results of *in situ* gamma-spectrometry) ambient dose rate equivalent rate in air ($ADER_{Cs}$) and calculated (based on results of soil samples analysis *ex situ*) air kerma rate (KR_{Cs}) due to ^{137}Cs at the forest and grassland plots surveyed in the Bryansk region in 2015–2016]

Код участка [Plot code]	$ADER_{Cs-prim}$ (нЗв/ч) [$ADER_{Cs-prim}$ (nSv/h)]	$ADER_{Cs-tot}$ (нЗв/ч) [$ADER_{Cs-tot}$ (nSv/h)]	Вклад $ADER_{Cs-prim}$ в $ADER_{Cs-tot}$ (%) [Input of $ADER_{Cs-prim}$ to $ADER_{Cs-tot}$ (%)]	BUF_{Cs}	KR_{Cs-tot} (нГр/ч)* [KR_{Cs-tot} (nGy/h)*]	$ADER_{Cs-tot} / KR_{Cs-tot}$ (Зв/Гр) [$ADER_{Cs-tot} /$ KR_{Cs-tot} (Sv/Gy)]
Лес (n = 13) [Forest (n = 13)]						
Zab-f-1	1430	2700	53	1,89	2300	1,17
Zab-f-2	1250	2300	54	1,84	1830	1,25
Yal-fo	341	613	56	1,80	563	1,09
NB-f-b	499	914	55	1,83	977	0,94
Bab-fo	799	1540	52	1,92	1090	1,42
Gri-fo	410	734	56	1,79	669	1,10
Kho-fo	118	228	52	1,93	189	1,21
Dem-f-p	321	646	50	2,02	458	1,41
Vep-f-C	499	893	56	1,79	681	1,31
Mur-f-ol	583	997	58	1,71	958	1,04
Pes-f-1	34,1	62,3	55	1,83	52,8	1,18
Pes-f-2	43,2	75,0	58	1,74	66,7	1,13
Mam-fo	208	426	49	2,04	377	1,13
Медиана [Median]	410	734	55	1,83	669	1,17
Средняя [Mean]	502	932	54	1,86	785	1,18
С.о. [SD]	432	807	3	0,10	665	0,14
Луг (n = 7) [Grassland (n = 7)]						
Mur-1	575	1020	56	1,78	878	1,17
Dem-Ind	456	803	57	1,76	682	1,18
Vep-Ush	329	678	49	2,06	532	1,27
Mur-2	558	1020	55	1,83	862	1,18
Bab-Gol	535	1190	45	2,23	903	1,32
Bab-Hig	1000	1770	57	1,76	1680	1,05
Bab-wel	488	1080	45	2,22	828	1,31
Медиана [Median]	535	1020	55	1,83	862	1,18
Средняя [Mean]	563	1080	52	1,95	910	1,21
С.о. [SD]	210	348	5	0,21	366	0,10

$ADER_{Cs-prim}$ – мощность дозы, обусловленная первичными фотонами с энергией 662 кэВ от $^{137}Cs-^{137m}Ba$;

$ADER_{Cs-tot}$ – мощность дозы, обусловленная всеми фотонами от $^{137}Cs-^{137m}Ba$;

KR_{Cs-tot} – мощность воздушной кермы, обусловленная всеми фотонами от $^{137}Cs-^{137m}Ba$ (для влажной почвы);

BUF_{Cs} – дозовый фактор накопления;

* – рассчитано в предположении, что надземная биомасса отсутствует;

С.о. – стандартное отклонение.

$[ADER_{Cs-prim}]$ – air dose rate due to the primary 662 keV photons from $^{137}Cs-^{137m}Ba$;

$ADER_{Cs-tot}$ – air dose rate due to all photons from $^{137}Cs-^{137m}Ba$;

KR_{Cs-tot} – air kerma rate due to all photons from $^{137}Cs-^{137m}Ba$ (for wet soil);

BUF_{Cs} – ambient dose equivalent build-up factor;

* – calculated under the assumption that the aboveground biomass is absent;

SD – standard deviation.]

Расчеты показали (табл. 3), что присутствие деревьев могло снизить мощность воздушной кермы на 1,6–12,1%. Средняя величина снижения KR_{Cs} практически прямо пропорционально увеличивалась с нарастанием биомассы: 2,7% ($\rho = 1 \text{ кг/м}^3$), 5,3% ($\rho = 2 \text{ кг/м}^3$), 10,0% ($\rho = 4 \text{ кг/м}^3$). Между степенью снижения кермы в воздухе и средней глубиной миграции ^{137}Cs в почве была обнаружена статистически значимая негативная корреляция ($R_{sp} = -0,839$, $P < 0,01$; $n = 13$).

Таблица 3

Расчетное снижение мощности кермы в воздухе от источника ^{137}Cs в почве за счет надземной биомассы на лесных участках ($n = 13$), обследованных в Брянской области в 2015 г.

[Table 3]

Estimated reduction of the air kerma from the ^{137}Cs source in the ground by the above-ground biomass at forest plots ($n = 13$) surveyed in the Bryansk region in 2015]

Параметр [Parameter]	Уменьшение кермы (%) при плотности биомассы: [Kerma decrease (%) at the biomass density of:]		
	1 кг/м ³ [1 kg/m ³]	2 кг/м ³ [2 kg/m ³]	4 кг/м ³ [4 kg/m ³]
Минимум [Minimum]	1,6	3,1	6,0
Максимум [Maximum]	3,3	6,5	12,1
Медиана [Median]	3,0	5,8	10,9
Средняя [Mean]	2,7	5,3	10,0
С.о. [SD]	0,6	1,1	2,0

С.о. – стандартное отклонение.
[SD – standard deviation].

Взаимосвязь между $ADER_{Cs}$ и KR_{Cs}

Измеренные значения мощности дозы гамма-излучения ^{137}Cs ($ADER_{Cs-tot}$) положительно и статистически значимо коррелировали с расчетными значениями KR_{Cs-tot} . Коэффициент корреляции был равен 0,989 ($P < 0,01$) для локации «Лес» и 0,893 ($P < 0,05$) для локации «Луг». Соотношения между измеренными и вычисленными значениями мощности дозы гамма-излучения ^{137}Cs в воздухе в лесу и на лугу графически представлены на рисунке 2. Индивидуальные значения отношения $ADER_{Cs-tot}$ к KR_{Cs-tot} в лесу колебались от 0,94 до 1,42 Зв/Гр (см. табл. 2) при средней величине 1,18 Зв/Гр. Диапазон колебаний отношения $ADER_{Cs-tot}$ к KR_{Cs-tot} на лугу был несколько меньшим – от 1,05 до 1,32 Зв/Гр. Среднее значение составило 1,21 Зв/Гр. Статистически значимых различий между локациями «Лес» и «Луг» при анализе соотношения измеренных и расчетных значений мощности дозы выявлено не было ($P > 0,05$).

Соотношение между амбиентным эквивалентом дозы (ADE) и воздушной кермой (K) зависит от энергии фотонов (см.: Table A.21. в документе No. 74 ICRP [20] и Fig. 1 в работе [21]). В частности, при уменьшении энергии фотона с 800 кэВ до 60 кэВ отношение ADE к K увеличивается с 1,19 до 1,74 Зв/Гр. Теоретическое значение коэффициента перехода от K к ADE равно приблизительно 1,20 Зв/Гр для фотонов с энергией 662 кэВ [20, 21]. Для гамма-поля, которое формируется от источника ^{137}Cs , находящегося в почве и в надземной растительности, средняя энергия гамма-излучения всегда меньше, чем энергия первичных гамма-квантов ^{137}Cs – ^{137m}Ba [21]. Отношение ADE/K в этом случае, напротив, превышает значение 1,20 Зв/Гр. В частности, в 2009 г. для луговых экосистем среднее значение отношения измеренной $ADER_{Cs-tot}$ к измеренной мощности поглощенной дозы в воздухе (равна мощнос-

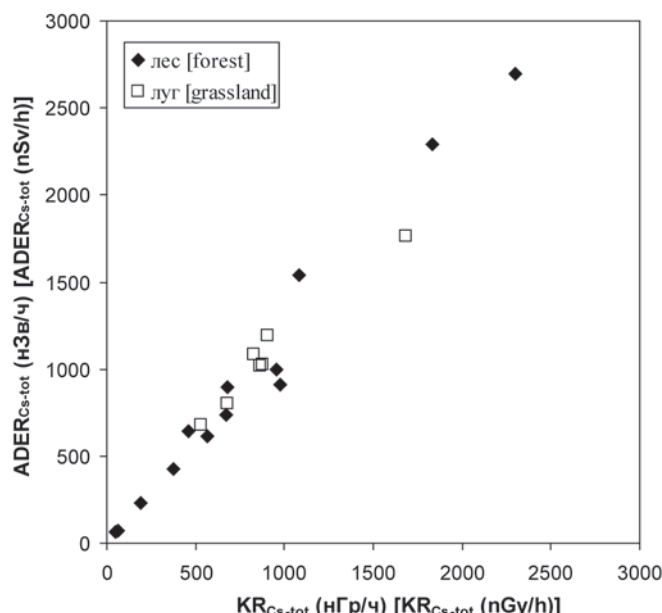


Рис. 2. Соотношение между вычисленной мощностью воздушной кермы (KR_{Cs-tot}) от ^{137}Cs в почве (на влажный вес) и измеренной мощностью амбиентного эквивалента дозы от ^{137}Cs ($ADER_{Cs-tot}$) на 13 лесных и 7 луговых площадках, обследованных в Брянской области в 2015–2016 гг.

[Fig. 2. Relationship between calculated air kerma rate (KR_{Cs-tot}) from ^{137}Cs in soil (on wet weight basis) and measured ambient dose equivalent rate from ^{137}Cs ($ADER_{Cs-tot}$) at 13 forest and 7 grassland plots surveyed in the Bryansk region in 2015–2016]

ти воздушной кермы, KR_{Cs-tot} при условии электронного равновесия) было равно 1,23 Зв/Гр [21]. Близкие значения (1,24–1,26 Зв/Гр) приводят Saito and Petoussi-Henss [22] на основе вычислений K и ADE от источника ^{137}Cs , вертикальное распределение которого в почве описывается негативной экспоненциальной зависимостью. В нашем исследовании отношение $ADER_{Cs-tot}$ к KR_{Cs-tot} для открытой местности (луг) в среднем было равно 1,21 Зв/Гр. Это соотношение между амбиентным эквивалентом дозы и воздушной кермой для открытой местности на несколько процентов меньше, чем то, которое можно ожидать согласно теоретическим выкладкам [20] и результатам других экспериментальных работ [21, 22]. В лесу отношение $ADER_{Cs-tot}$ к KR_{Cs-tot} (1,18 Зв/Гр) были меньше примерно на 2% по сравнению с таковым на лугу (см. табл. 2). Однако разница между локациями «Луг» и «Лес» не являлась статистически значимой. Отсутствие статистически значимых различий между локациями «Лес» и «Луг» могло быть связано с присутствием ^{137}Cs в лесной биомассе, что оказывало компенсирующее влияние на ослабление потока фотонов в воздухе самой биомассой. Кроме того, при расчете воздушной кермы на лугу мы не учитывали присутствие травяной растительности над поверхностью почвы. Показано, что в отдаленный период после выпадений радиоактивного цезия развитый травяной покров (плотность биомассы = 1,5 кг/м²) ослабляет KR_{Cs-tot} примерно на 2% [23]. Добавим, что во время полевого обследования как лесных, так и луговых площадок мы отмечали присутствие неровностей на поверхности почвы. Это является дополнительным фактором [24], который приводит к уменьшению потока фотонов в воздухе на реальных участках по сравнению с идеально плоской земляной поверхностью, для которой проводился расчет KR_{Cs-tot} в настоящем исследовании и в работе Saito and Petoussi-Henss [22].

Обнаруженный разброс индивидуальных значений отношения $ADER_{Cs-tot}/KR_{Cs-tot}$ (до $\pm(19-25)\%$ от средней) мог быть связан, прежде всего, с неопределенностью результатов измерения запаса ^{137}Cs на площадках и вычисления результирующей мощности кермы в воздухе без учета влияния надземной биомассы. Вариабельность содержания воды в почве оказывала небольшое влияние на неопределенность вычислений. Однако отметим, что в целом при этом имелся систематический сдвиг в сторону занижения кермы. В модели [7] содержание воды в почве равнялось 20%. В реальности влажность почвы была значительно ниже – в пределах 6% [17]. Занижение расчетной кермы могло составить при этом 1–2%, т.к. в воде интенсивность потока фотонов ослабляется в 1,11 раз больше, чем в высушенной почве [23, 25].

Плотность биомассы в настоящей работе экспериментально не определялась, однако это тоже является существенным фактором, вносящим неопределенность в соотношение между кермой и амбиентным эквивалентом дозы (см. табл. 3; см. также Fig. 3 в [7]). Вместе с тем, ранее другими авторами было показано, что при заглублении ^{137}Cs в почву ослабляющее влияние биомассы на мощность дозы гамма-излучения заметно снижается [7, 8, 12]. Наши расчеты, проведенные для распределений ^{137}Cs в почве на конкретных 13 лесных площадках, подтверждают данный вывод. Поэтому по мере удаления от

момента выпадений с учетом естественной вертикальной миграции радионуклидов в почве влияние надземной биомассы на результаты расчетов мощности дозы в воздухе будет уменьшаться. Собственно измерение мощности дозы гамма-излучения *in situ* привнесило неопределенность в вычисления отношения $ADER_{Cs-tot}/KR_{Cs-tot}$ на уровне нескольких процентов.

Наши результаты, свидетельствующие об отсутствии принципиальных различий между локациями «Луг» и «Лес» в части соотношения между расчетными и измеренными значениями мощности дозы гамма-излучения в воздухе, в целом согласуются с аналогичными данными, которые были получены в работе В.П. Рамзаева и В.Ю. Голикова [19] при обследовании радиоактивно загрязненных лугов и лесов в Брянской области в 2010 г. В работе [19] авторы использовали сведения о вертикальных распределениях ^{137}Cs в 20-сантиметровых кернах почвы. Отметим, что в работе [19] была измерена мощность поглощенной дозы в воздухе (DR_{Cs-tot} , нГр/ч), а не $ADER_{Cs-tot}$, как это было в нашем случае. Для больших открытых луговых площадок ($n = 19$) было обнаружено, что измеренная DR_{Cs-tot} была в среднем на 7% меньше, чем вычисленная KR_{Cs-tot} от ^{137}Cs в почве. В лесах ($n = 5$) эта разница составила 11% (вычислено нами по данным таблицы 2 из работы [19]). Приблизительно 4% разница между локациями «Лес» и «Луг» не является статистически значимой ($P > 0,05$). Сопоставление результатов исследований 2010 г. [19] и 2015–2016 гг. указывает на то, что при вычислении мощности дозы гамма-излучения в воздухе в лесу с использованием модели [7] и выражения (1) на отдаленном этапе после Чернобыльской аварии достаточно знать величину запаса ^{137}Cs в верхнем 20-сантиметровом слое почвы и подробную картину вертикального распределения радионуклида в этом слое. Присутствием радиоактивно загрязненной надземной древесной биомассы можно пренебречь (значение p в выражении (1) принимается равным 0). Такая оценка мощности дозы является консервативной. Однако степень консервативности невелика – в среднем в пределах +10%. Для лугов расчетная доза гамма-излучения в воздухе от источника ^{137}Cs , расположенного в почве, будет на 5–7% выше, чем реально измеренная с помощью полевого гамма-спектрометра.

Выводы

1. На 13 лесных и 7 луговых целинных площадках, обследованных в юго-западных районах Брянской области спустя 30 лет после Чернобыльской аварии, измеренные значения мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения в воздухе находились в диапазоне от 87 до 2730 нЗв/ч. ^{137}Cs являлся доминирующим источником гамма-излучения; вклад природных радионуклидов в мощность дозы был равен в среднем 3%.

2. Ранее опубликованные данные о запасах и вертикальном распределении ^{137}Cs в почве на обследованных площадках были использованы для вычисления мощности воздушной кермы с применением метода расчета, заимствованного из литературы. Расчетные значения воздушной кермы статистически значимо коррелировали с измеренными значениями мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения ^{137}Cs . Коэффициент корреляции был равен 0,989 ($P < 0,01$) для локации «Лес» и 0,893 ($P < 0,05$) для локации «Луг». Статистически зна-

чимых различий между локациями «Лес» и «Луг» при анализе соотношения измеренных и расчетных значений мощности дозы выявлено не было ($P > 0,05$).

3. Измеренные значения мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения в воздухе и запаса ^{137}Cs в почве строго коррелировали между собой. Ранговый коэффициент корреляции Спирмена был равен 0,978 ($P < 0,01$) в лесу и 0,964 ($P < 0,01$) на лугу.

4. При вычислении мощности дозы гамма излучения в воздухе в лесу на отдаленном этапе после Чернобыльской аварии достаточно знать величину запаса ^{137}Cs в верхнем 20-сантиметровом слое почвы и подробную картину вертикального распределения данного радионуклида в этом слое. Присутствием надземной древесной биомассы можно пренебречь. Такая оценка является консервативной. Однако степень завышения мощности дозы в воздухе будет невелика – в пределах +10%, что вполне приемлемо для корректного определения дозы внешнего облучения человека при его нахождении в радиоактивно загрязненном лесу.

Благодарность

Авторы выражают благодарность Варфоломеевой Ксении Владимировне (ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева) за помощь на этапе проведения полевых исследований.

Литература

- Shaw, G. Radionuclides in forest ecosystems. *Radioactivity Environ.*, 2007, Vol. 10, pp. 127–155.
- Nimis, P.L. Radiocesium in plants of forest ecosystems. *Studia Geobotanica*, 1996, Vol. 15, pp. 3–49.
- Shcheglov, A.I., Tsvetnova, O.B., Klyashtorin, A.L. Biogeochemical Migration of Technogenic Radionuclides in Forest Ecosystems. Nauka, Moscow, 2001.
- Shcheglov, A., Tsvetnova, O., Klyashtorin, A. Biogeochemical cycles of Chernobyl-born radionuclides in the contaminated forest ecosystems. Long-term dynamics of the migration processes. *J. Geochem. Explor.*, 2014, Vol. 144, pp. 260–266.
- Imamura, N., Komatsu, M., Ohashi, S., Hashimoto, S., Kajimoto, T., Kaneko, S., Takano, T. Temporal changes in the radiocesium distribution in forests over the five years after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Sci. Rep.*, 2017, 7: 8179. DOI: 10.1038/s41598-017-08261-x.
- Kato, H., Onda, Y., Hisadome, K., Loffredo, N., Kawamori, A. Temporal changes in radiocesium deposition in various forest stands following the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *J. Environ. Radioact.*, 2017, Vol. 166, pp. 449–457.
- 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.
- Gering, F., Kiefer, P., Fesenko, S., Voigt, G. In situ gamma-ray spectrometry in forests: determination of kerma rate in air from ^{137}Cs . *J. Environ. Radioact.*, 2002, Vol. 61, pp. 75–89.
- McGee, E.J., Synnott, H.J., Johanson, K.J., Fawaris, B.H., Nielsen, S.P., Horrill, A.D., Kennedy, V.H., Barbayannis, N., Veresoglou, D.S., Dawson, D.E., Colgan, P.A., McGarry, A.T. Chernobyl fallout in a Swedish spruce forest ecosystem. *J. Environ. Radioact.*, 2000, Vol. 48, pp. 59–78.
- Данилов, Ю.Г. Роль геохимической миграции радионуклидов в реабилитации загрязненных территорий Брянской области / Ю.Г. Данилов // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология* [Электронный ресурс]. – 2000. – № 1. – С. 84–86: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/geograph/2000/01/danilov2.pdf> (Дата обращения: 11.07.2019)
- Clouvas, A., Xanthos, S., Antonopoulos-Domis, M., Alifragis, D.A. Contribution of ^{137}Cs to the total absorbed gamma dose rate in air in a Greek forest ecosystem: measurements and Monte-Carlo computations. *Health Phys.*, 1998, Vol. 76, No. 1, pp. 36–43.
- Cresswell, A.J., Sanderson, D.C.W., Yamaguchi, K. Assessment of the calibration of gamma spectrometry systems in forest environments. *J. Environ. Radioact.*, 2018, Vol. 181, pp. 70–77.
- Miller, K.M., Kuiper, J.L., Helfer, I.K. ^{137}Cs fallout depth distributions in forest versus field sites: implications for external gamma dose rates. *J. Environ. Radioact.*, 1990, Vol. 12, pp. 23–47.
- Ramzaev, V., Barkovsky, A. Vertical distribution of ^{137}Cs in grassland soils disturbed by moles (*Talpa europaea* L.). *J. Environ. Radioact.*, 2018, Vol. 184–185, pp. 101–108.
- Ramzaev, V., Barkovsky, A., Bernhardsson, C., Mattsson, S. Calibration and testing of a portable NaI(Tl) gamma-ray spectrometer-dosimeter for evaluation of terrestrial radionuclides and ^{137}Cs contributions to ambient dose equivalent rate outdoors. *Radiationnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2017, Vol. 10, No. 1, pp. 18–29.
- Ramzaev, V., Bernhardsson, C., Barkovsky, A., Romanovich, I., Jarneborn, J., Mattsson, S., Dvornik, A., Gaponenko, S. A backpack γ -spectrometer for measurements of ambient dose equivalent rate, $H^*(10)$, from ^{137}Cs and from naturally occurring radiation: The importance of operator related attenuation. *Radiat. Meas.*, 2017, Vol. 107, pp. 14–22.
- Рамзаев, В.П. Вертикальное распределение ^{137}Cs в дерново-подзолистой песчаной почве на лугах и в лесах Брянской области в 2015–2016 гг. / В.П. Рамзаев, А.Н. Барковский, К.В. Варфоломеева // *Радиационная гигиена*. – 2019. – Т. 12, № 3. – С. 6–20.
- 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.
- Рамзаев, В.П. Сравнение расчетных и измеренных значений мощности кермы в воздухе над почвой, загрязненной ^{137}Cs / В.П. Рамзаев, В.Ю. Голиков // *Радиационная гигиена*. – 2015. – Т. 8, № 4. – С. 42–51.
- ICRP – International Commission on Radiological Protection. Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74 // *Ann. ICRP*, 1996, Vol. 26, No. 3–4.
- Ramzaev, V.P., Barkovsky, A.N. On the relationship between ambient dose equivalent and absorbed dose in air in the case of large-scale contamination of the environment by radioactive cesium. *Radiationnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2015, Vol. 8, No. 3, pp. 6–20.
- Saito, K., Petoussi-Henss, N. Ambient dose equivalent conversion coefficients for radionuclides exponentially distributed in the ground. *J. Nucl. Sci. Technol.*, 2014, Vol. 51, pp. 1274–1287.
- Ramzaev, V.P., Barkovsky, A.N. Estimation of the air kerma rate from ^{137}Cs and ^{134}Cs deposited on the ground in the Sakhalin region of Russia after the Fukushima accident. *Radiationnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2019, Vol. 12, No. 1, pp. 36–51.
- Laedermann, J.-P., Byrde, F., Murith, C. *In-situ* gamma-ray spectrometry: the influence of topography on the accuracy of activity determination. *J. Environ. Radioact.*, 1998, Vol. 38, pp. 1–16.
- 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.

Поступила: 11.07.2019 г.

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

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

Для цитирования: Рамзаев В.П., Барковский А.Н. Корреляция между расчетными и измеренными значениями мощности дозы гамма-излучения в воздухе в лесах, загрязненных ^{137}Cs : отдаленный период после Чернобыльской аварии // Радиационная гигиена. – 2019. – Т. 12, № 4. – С. 37–46. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-37-46

Correlation between calculated and measured values of gamma dose rate in air in forests contaminated with ^{137}Cs : the remote period after the Chernobyl accident

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

In 2015–2016, 13 forest and 7 virgin grassland plots located in the south-western districts of the Bryansk region were surveyed. The aim of the work was to experimentally test the possibility of using a method for calculating the dose rate of gamma radiation in air in radioactively contaminated forests in a remote period after the Chernobyl accident. According to the results of gamma-spectrometric analysis of soil samples obtained at the sites in another study, the values of inventory and vertical distribution of ^{137}Cs in the upper 20 cm layer were established. In this paper, these data were used to calculate the air kerma rate using a method taken from literature. In addition, at the sites of soil sampling, ambient dose equivalent rate in air was measured, and the contribution of ^{137}Cs to the total gamma dose rate was determined with a field gamma spectrometer-dosemeter. The measured values of the ambient dose equivalent rate from ^{137}Cs correlated positively and statistically significantly with the calculated values of the air kerma rate. The Spearman correlation coefficient was 0.989 ($P < 0.01$) for the location “forest” and 0.893 ($P < 0.05$) for the location “grassland”. There was no statistically significant difference between the “forest” and “grassland” locations when analyzing the ratio of the measured dose rate values to the calculated dose rate values (the Mann-Whitney U test, $P > 0.05$). Results of this work show that, when calculating gamma radiation dose rate in air in forests at a remote stage after the Chernobyl accident, it is enough to know the ^{137}Cs inventory in the upper 20 cm soil layer and a detailed picture of vertical distribution of the radionuclide in this layer. The presence of woody biomass can be neglected. This dose rate estimate is conservative. However, a degree of overestimation of the dose rate in air is small, within +10%, which is quite acceptable for determining the external effective dose rate for an individual in the radioactively contaminated forest.

Key words: forest, grassland, soil, ^{137}Cs , air kerma, ambient dose equivalent.

References

1. Shaw, G. Radionuclides in forest ecosystems. Radioactivity Environ., 2007, Vol. 10, pp. 127–155.
2. Nimis, P.L. Radiocesium in plants of forest ecosystems. Studia Geobotanica, 1996, Vol. 15, pp. 3–49.
3. Shcheglov, A.I., Tsvetnova, O.B., Klyashtorin, A.L. Biogeochemical Migration of Technogenic Radionuclides in Forest Ecosystems. Nauka, Moscow, 2001.
4. Shcheglov, A., Tsvetnova, O., Klyashtorin, A. Biogeochemical cycles of Chernobyl-born radionuclides in the contaminated forest ecosystems. Long-term dynamics of the migration processes. J. Geochem. Explor., 2014, Vol. 144, pp. 260–266.
5. Imamura, N., Komatsu, M., Ohashi, S., Hashimoto, S., Kajimoto, T., Kaneko, S., Takano, T. Temporal changes in the radiocesium distribution in forests over the five years after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. Sci. Rep., 2017, 7: 8179. DOI:10.1038/s41598-017-08261-x.

Valery P. Ramzaev

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

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

6. Kato, H., Onda, Y., Hisadome, K., Loffredo, N., Kawamori, A. Temporal changes in radiocesium deposition in various forest stands following the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *J. Environ. Radioact.*, 2017, Vol. 166, pp. 449–457.
7. 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.
8. Gering, F., Kiefer, P., Fesenko, S., Voigt, G. In situ gamma-ray spectrometry in forests: determination of kerma rate in air from ^{137}Cs . *J. Environ. Radioact.*, 2002, Vol. 61, pp. 75–89.
9. McGee, E.J., Synnott, H.J., Johanson, K.J., Fawaris, B.H., Nielsen, S.P., Horrill, A.D., Kennedy, V.H., Barbayannis, N., Veresoglou, D.S., Dawson, D.E., Colgan, P.A., McGarry, A.T. Chernobyl fallout in a Swedish spruce forest ecosystem. *J. Environ. Radioact.*, 2000, Vol. 48, pp. 59–78.
10. Danilov, Yu.G. The role of geochemical migration of radionuclides in the rehabilitation of contaminated areas of the Bryansk region. *Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geography. Geocology* [Electronic resource]. 2000, No. 1, pp. 84–86. – Available on: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/geography/2000/01/danilov2.pdf> (Accessed: 11/07/2019) (in Russian).
11. Clouvas, A., Xanthos, S., Antonopoulos-Domis, M., Alifragis, D.A. Contribution of ^{137}Cs to the total absorbed gamma dose rate in air in a Greek forest ecosystem: measurements and Monte-Carlo computations. *Health Phys.*, 1998, Vol. 76, No. 1, pp. 36–43.
12. Cresswell, A.J., Sanderson, D.C.W., Yamaguchi, K. Assessment of the calibration of gamma spectrometry systems in forest environments. *J. Environ. Radioact.*, 2018, Vol. 181, pp. 70–77.
13. Miller, K.M., Kuiper, J.L., Helfer, I.K. ^{137}Cs fallout depth distributions in forest versus field sites: implications for external gamma dose rates. *J. Environ. Radioact.*, 1990, Vol. 12, pp. 23–47.
14. Ramzaev, V., Barkovsky, A. Vertical distribution of ^{137}Cs in grassland soils disturbed by moles (*Talpa europaea* L.). *J. Environ. Radioact.*, 2018, Vol. 184–185, pp. 101–108.
15. Ramzaev, V., Barkovsky, A., Bernhardsson, C., Mattsson, S. Calibration and testing of a portable NaI(Tl) gamma-ray spectrometer-dosimeter for evaluation of terrestrial radionuclides and ^{137}Cs contributions to ambient dose equivalent rate outdoors. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2017, Vol. 10, No. 1, pp. 18–29.
16. Ramzaev, V., Bernhardsson, C., Barkovsky, A., Romanovich, I., Jarneborn, J., Mattsson, S., Dvornik, A., Gaponenko, S. A backpack γ -spectrometer for measurements of ambient dose equivalent rate, $H^*(10)$, from ^{137}Cs and from naturally occurring radiation: The importance of operator related attenuation. *Radiat. Meas.*, 2017, Vol. 107, pp. 14–22.
17. Ramzaev, V.P., Barkovsky, A.N., Varfolomeeva, K.V. Vertical distribution of ^{137}Cs in soddy-podzolic sandy soil in grasslands and forests of the Bryansk region in 2015–2016. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2019, Vol. 12, No. 3, pp. 6–20 (in Russian).
18. 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.
19. Ramzaev, V.P., Golikov, V.Yu. A comparison of measured and calculated values of air kerma rates from ^{137}Cs in soil. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2015, Vol. 8, No. 4, pp. 42–51 (in Russian).
20. ICRP – International Commission on Radiological Protection. Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74 // Ann. ICRP, 1996, Vol. 26, No. 3–4.
21. Ramzaev, V.P., Barkovsky, A.N. On the relationship between ambient dose equivalent and absorbed dose in air in the case of large-scale contamination of the environment by radioactive cesium. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2015, Vol. 8, No. 3, pp. 6–20.
22. Saito, K., Petoussi-Hens, N. Ambient dose equivalent conversion coefficients for radionuclides exponentially distributed in the ground. *J. Nucl. Sci. Technol.*, 2014, Vol. 51, pp. 1274–1287.
23. Ramzaev, V.P., Barkovsky, A.N. Estimation of the air kerma rate from ^{137}Cs and ^{134}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.
24. Laedermann, J.-P., Byrde, F., Murith, C. *In-situ* gamma-ray spectrometry: the influence of topography on the accuracy of activity determination. *J. Environ. Radioact.*, 1998, Vol. 38, pp. 1–16.
25. 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: July 11, 2019

For correspondence: Valery P. Ramzaev – Candidate of Medical Sciences, Leading Researcher of the Laboratory of External Exposure, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (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.

For citation: Ramzaev V.P., Barkovsky A.N. Correlation between calculated and measured values of gamma dose rate in air in forests contaminated with ^{137}Cs : the remote period after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2019, Vol. 12, No. 4, pp. 37–46. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-37-46

Использование метода бета-подстановки для анализа цензурированных данных об объемной активности радона в воздухе помещений

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

При обработке результатов измерений объемной активности радона, проводимых в рамках радоновых обследований на различных уровнях административно-территориального деления, существует проблема учета результатов, значение которых не превышает нижней границы диапазона измерений использованного типа средств измерений, т.е. задача анализа цензурированных слева данных. В данной работе на практическом примере продемонстрирована возможность применения одного из наиболее точных, но при этом несложных с вычислительной точки зрения методов анализа цензурированных данных — метода бета-подстановки — для анализа массива результатов измерений объемной активности радона в воздухе помещений. Выполнен анализ результатов радонового обследования, проведенного в рамках региональной программы «Радон» в Красносельском районе Санкт-Петербурга в 2000 г. Показано, что грубые подходы к решению обозначенной задачи, такие как отбрасывание цензурированных значений или их замена на значение нижней границы диапазона измерений, могут приводить к существенному смещению оценок параметров или статистических характеристик получаемых распределений, которые в дальнейшем используются при расчете доз внутреннего облучения населения радоном и различных показателей риска для здоровья населения, что приводит к заметному их завышению. Результаты визуального и количественного анализа Q-Q диаграмм позволяют сделать вывод о том, что оцененные параметры распределения, полученного после применения метода бета-подстановки, характеризуются минимальным смещением. Использованный метод бета-подстановки может быть рекомендован для применения в качестве элемента в процедуре обработки результатов радоновых обследований для минимизации смещения оценок параметров распределений значений объемной активности радона, наряду с методом построения и анализа Q-Q диаграмм, применяемым для проверки соответствия полученных распределений логнормальному закону.

Ключевые слова: радон, объемная активность, анализ цензурированных данных, бета-подстановка, логнормальное распределение, параметры распределения, Q-Q диаграмма, оценка риска.

Введение

За последние несколько лет были опубликованы результаты ряда радоновых обследований, проведенных на территории нескольких субъектов РФ с различными целями (см., например, [1–6]). Вне зависимости от того, проводилась ли проверка соответствия распределений результатов измерений логнормальному закону и приведены ли в публикациях параметры полученных распределений, общим моментом для этих работ (а также целого ряда более ранних публикаций) является отсутствие информации о том, какая доля результатов измерений не превысила нижней границы диапазона измерений (НГДИ) использовавшегося типа средств измерений (СИ) и каким образом подобные результаты учитывались при расчете параметров распределений (например, медианы,

совпадающей для логнормального распределения с геометрическим средним) или статистических характеристик (арифметического среднего и квантилей). Следует заметить, что грубые подходы к решению этой задачи, такие как отбрасывание подобных результатов или их замена на значение НГДИ, могут приводить к существенному смещению оценок [7].

Между тем для расчета параметров распределений физических величин, результаты измерений которых часто не превышают НГДИ, существует ряд методов, объединенных общим термином «анализ цензурированных данных» (см., например, [8, 9]). Методы применяются для физических величин, распределение которых носит, как правило, логнормальный характер, а данные при этом цензурированы слева (т.е. присутствуют результаты, зна-

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

чение которых составляет менее нижней границы диапазона измерений). Некоторые методы с успехом применяются даже в том случае, когда распределение является так называемым смешанным [10], т.е. составленным из распределений результатов измерений, полученных с использованием разных методик или типов СИ с отличающимися НГДИ. В этом случае в массиве данных могут присутствовать результаты измерений, лежащие между несколькими НГДИ.

Как известно, распределение значений объемной активности (ОА) радона в воздухе помещений носит именно логнормальный характер [11, 12]. Этот факт был также подтвержден путем анализа массива данных, содержащего более 800 тыс. результатов измерений содержания радона в воздухе помещений в 78 субъектах РФ [13]. Поскольку характеристики и параметры распределений значений ОА радона (например, медиана), получаемых после обработки результатов радоновых обследований, в дальнейшем используются при расчете доз внутреннего облучения населения радоном и различных показателей риска для здоровья населения, представляется весьма важным, чтобы смещение оценок параметров распределений было минимизировано. И одним из способов решения этой задачи является использование в процессе обработки результатов измерений методов анализа цензурированных данных. В данном случае речь идет исключительно о результатах, полученных в рамках спланированных радоновых обследований, когда точно известна методика измерения, тип применявшегося СИ и его НГДИ. Это кардинально отличает подобные результаты от тех, что содержатся в банках данных (БД), задействованных в Единой государственной системе контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан (ЕСКИД): БД лабораторий радиационного контроля «ФФ-4» [14], региональных банков данных доз облучения граждан Российской Федерации за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона (РБДОПИ) и Федеральном банке данных доз облучения граждан Российской Федерации за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона (ФБДОПИ). Подавляющая часть содержащихся в них данных представляет собой результаты измерений содержания радона в воздухе помещений, проводимых в рамках обследований зданий перед сдачей в эксплуатацию или в рамках контрольно-надзорных мероприятий. Однако ключевым недостатком программного обеспечения для ведения этих БД, из-за которого применение методов анализа цензурированных данных становится невозможным, является отсутствие возможности указать, что результат измерения не превышает НГДИ конкретного типа СИ, который также невозможно указать в качестве дополнительной характеристики результата измерения [13].

В отечественных публикациях использование методов анализа цензурированных данных применительно к результатам измерений содержания радона в воздухе или воде ранее описано не было, зарубежные публикации на эту тему немногочисленны [15, 16].

Цель исследования – продемонстрировать на практическом примере возможность применения одного из наиболее точных, но при этом несложных с вычислительной точки зрения методов анализа цензурированных данных – метода бета-подстановки – для анализа массива результатов радонового обследования.

Материалы и методы

Методы анализа цензурированных данных уже не один десяток лет с успехом применяются при анализе результатов измерений содержания различных загрязнителей в воде, пищевых продуктах и других средах. Некоторые методы рекомендованы к применению авторитетными международными организациями, такими как Европейское агентство по безопасности продуктов питания [17] и Всемирная организация здравоохранения [18]. Среди наиболее часто применяющихся можно упомянуть метод оценки максимального правдоподобия (MLE) [19–22], метод лог-пробит регрессии (LPR) [22, 23], метод Каплана – Мейера (К-М) [24, 25], Байесовский метод [26, 27] и наиболее простые методы подстановки LOD/2 и LOD/ $\sqrt{2}$ [19, 22, 28].

До 2010 г. «золотым стандартом» во многих случаях считался MLE-метод [22, 29], поскольку он давал минимальное смещение оценки и среднеквадратичную ошибку, являющуюся показателем общей точности оценки. Однако данный метод является и наиболее сложным с вычислительной точки зрения. Поиск компромиссного варианта, сочетающего в себе точность и простоту реализации, привел к разработке в 2010 г. метода бета-подстановки [29]. Ряд тестов, проведенных как разработчиками, так и группой независимых специалистов [30, 31], в ходе которых из логнормальных распределений со средним геометрическим, равным единице, и различными геометрическими стандартными отклонениями было сгенерировано от 1000 до 100 000 случайных выборок, показал, что метод бета-подстановки не только превосходит по точности методы подстановки LOD/2 и LOD/ $\sqrt{2}$, метод Каплана – Мейера и Байесовский метод, но и ничем не уступает MLE-методу при гораздо более простой вычислительной процедуре.

Метод бета-подстановки

При анализе методов подстановки LOD/2 и LOD/ $\sqrt{2}$, в которых каждое значение ниже НГДИ заменяется произведением НГДИ на 1/2 и 1/ $\sqrt{2}$ соответственно, авторы публикации [19] пришли к выводу, что оба этих метода дают несмещенные оценки истинного геометрического среднего и геометрического стандартного отклонения (GSD) только для определенных сочетаний GSD и доли цензурированных значений в массиве данных. Это послужило авторам публикации [29] отправной точкой в поисках некоторого коэффициента β (рассчитываемого на основе нецензурированных данных в массиве), который заменит множители 1/2 и 1/ $\sqrt{2}$, что в итоге даст практически нулевое смещение оценок искомых параметров распределения и минимальную среднеквадратичную ошибку.

В зависимости от того, какой параметр распределения оценивается (геометрическое или арифметическое среднее), значение коэффициента β определяется по-разному. После оценки геометрического и арифметического средних метод позволяет оценить GSD и далее квантили распределения. Процедура расчета в целом состоит из 8 шагов, ее несложно реализовать как с помощью любого табличного процессора, так и с помощью языков программирования, встроенных в распространенные программы статистической обработки данных.

Шаг 1. Из исходного массива данных объемом n значений, в котором содержится k цензурированных значений, формируется массив нецензурированных данных объемом $n-k$ значений.

Шаг 2. Рассчитываются входные и промежуточные значения:

$$\bar{y} = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} y_i, \quad (1)$$

где $y_i = \ln(x_i)$, а x_i – i -е значение из массива нецензурированных данных.

$$z = \Phi^{-1} \left[\frac{k}{n} \right], \quad (2)$$

где функция Φ^{-1} дает обратное значение стандартного нормального распределения ($\mu=0$; $\sigma=1$), т.е. z -значение, соответствующее k/n .

$$f(z) = \frac{pdf(z, 0, 1)}{1 - cdf(z, 0, 1)}, \quad (3)$$

$$\hat{s}_y = \frac{\bar{y} - \ln(L)}{f(z) - z} \quad (4)$$

$$f(\hat{s}_y, z) = \frac{1 - cdf(z - \frac{\hat{s}_y}{n}, 0, 1)}{1 - cdf(z, 0, 1)} \quad (5)$$

где $pdf(z, 0, 1)$ – функция плотности вероятности, а $cdf(z, 0, 1)$ – кумулятивная функция распределения стандартного нормального распределения;

$\hat{s}_y$ – предварительная оценка $\ln(GSD)$;

L – значение НГДИ.

Шаг 3. Рассчитывается коэффициент β для оценки арифметического среднего (AM):

$$\beta_{AM} = \frac{n}{k} \cdot cdf(z - \hat{s}_y, 0, 1) \cdot \exp \left[-\hat{s}_y \cdot z + \frac{(\hat{s}_y)^2}{2} \right] \quad (6)$$

Шаг 4. Каждое цензурированное значение в исходном массиве данных заменяется на произведение $L \cdot \beta_{AM}$, после чего по полученному массиву рассчитывается арифметическое среднее.

Шаг 5. Рассчитывается коэффициент β для оценки геометрического среднего (GM):

$$\beta_{GM} = \exp \left[\frac{-(n-k) \cdot n}{k} \cdot \ln(f(\hat{s}_y, z)) - \hat{s}_y \cdot \left(z - \frac{n-k}{2kn} \cdot (\hat{s}_y)^2 \right) \right] \quad (7)$$

Шаг 6. Каждое цензурированное значение в исходном массиве данных заменяется на произведение $L \cdot \beta_{GM}$, после чего по полученному массиву рассчитывается геометрическое среднее.

Шаг 7. Пересчитывается предварительная оценка $\ln(GSD)$ и затем рассчитывается GSD :

$$s_y = \sqrt{\frac{2n}{n-1} \cdot \ln \left(\frac{AM}{GM} \right)} \quad (8)$$

$$GSD = \exp(s_y) \quad (9)$$

В случае, если отношение $AM/GM \leq 1$, что реализуется в случае выборок небольшого объема, в которых результаты близки к НГДИ, значение s_y принимается равным 0, а значение GSD равным 1.

Шаг 8. Рассчитывается 0,95-квантиль распределения:

$$\hat{X}_{0,95} = \exp \left[\ln(GM) - \frac{s_y^2}{2n} + 1,645 \cdot s_y \right] \quad (10)$$

При необходимости расчета квантиля распределения другого уровня значение 1,645 должно быть заменено на значение квантиля стандартного нормального распределения нужного уровня.

Объем выборки при применении метода бета-подстановки должен составлять не менее 5 значений, а доля цензурированных значений не должна превышать 50%.

В случае, если массив исходных данных составлен из результатов измерений, полученных с использованием разных методик или типов СИ с отличающимися НГДИ, в качестве значения L , используемого в шагах 2, 4 и 6, используется значение $\bar{L}$, рассчитываемое следующим образом:

$$\bar{L} = \exp \left[\frac{1}{\sum m_i} \cdot \sum (m_i \cdot \ln(L_i)) \right], \quad (11)$$

где m_i – количество результатов измерений, цензурированных по i -й НГДИ L_i .

Использование метода бета-подстановки для анализа результатов измерений содержания радона в воздухе было протестировано на массиве результатов радонового обследования, проведенного в рамках региональной программы «Радон» в жилых и общественных зданиях г. Красное Село Красносельского района Санкт-Петербурга в 2000 г. [32]. Объем массива составил 369 значений ОА радона в воздухе помещений, из них ниже НГДИ, равной 25 Бк/м³, – 106 значений (уровень цензурирования составил около 29%).

Из результатов радонового обследования было сформировано три массива значений ОА радона. Отличие массивов состояло только в том, каким образом трактовались значения ниже НГДИ. В Массиве #1 все результаты ниже НГДИ были заменены на само значение НГДИ, в Массиве #2 – просто отброшены, а в Массиве #3 – заменены на результаты расчета с помощью метода бета-подстановки. Следует упомянуть, что авторами отчета [32] был выбран первый способ трактовки цензурированных данных: «Поскольку нас мало интересовали низкие значения ОА радона в воздухе помещений, при анализе распределения этих значений диапазон от 0 до 25 Бк/м³ был просто заменен его граничным значением».

Результаты и обсуждение

В таблице приведены результаты оценки параметров распределений значений ОА радона в каждом из трех описанных массивов, а на рисунках 1–3 – гистограммы частотного распределения и Q-Q диаграммы (диаграммы квантиль-квантиль или нормальные вероятностные графики) значений ОА радона в Массивах #1, #2 и #3 соответственно. Q-Q диаграмма используется для визуальной оценки того, насколько результаты измерений физической величины отклоняются от теоретических значений, полученных из нормального распределения с теми же параметрами, что и для эмпирических данных. В ка-

честве результатов измерений для построения Q-Q диаграмм используются натуральные логарифмы ОА радона (подробнее см. [13, 33]). В случае идеального совпадения результаты измерений и теоретические значения будут находиться на одной прямой. На Q-Q диаграммах, приведенных на рисунках 1–3, точки представляют собой результаты измерений, а прямая построена по теоретическим значениям. Плато из точек на рисунках 1 и 3 представляют собой значительное количество идентичных результатов измерений. По оси ординат отложены значения натурального логарифма ОА радона, а по оси абсцисс – z-значения (т.е. обратные значения стандартного нормального распределения, имеющего среднее, равное нулю, и стандартное отклонение, равное единице).

Результаты оценки параметров логнормальных распределений значений ОА радона по трем проанализированным массивам данных

Таблица

Results of the estimation of parameters of the lognormal distributions of radon concentrations for the three analyzed arrays

[Table

Показатель [Parameter]	Массив #1 [Array #1]	Массив #2 [Array #2]	Массив #3 [Array #3]
Объем массива, значений [Array size]	369	263	369
Геометрическое среднее (95% доверительный интервал), Бк/м ³ [Geometric mean (with 95% confidence interval), Bq/m ³]	73,0 (65,4–81,6)	112,5 (99,7–126,9)	56,3 (48,9–64,8)
Геометрическое стандартное отклонение [Geometric standard deviation]	3,0	2,7	4,1
Арифметическое среднее, Бк/м ³ [Arithmetic mean, Bq/m ³]	153,5	205,3	149,9

Несмотря на то, что для всех трех массивов наблюдается в целом хорошее соответствие распределения значений ОА радона логнормальному закону, практически идеальное совпадение результатов измерений с теоретическими значениями на Q-Q диаграмме для Массива #3 говорит в пользу того, что оцененные параметры именно этого распределения характеризуются минимальным смещением, что обеспечивается использованием метода бета-подстановки для обработки результатов измерений. Результат визуального анализа Q-Q диаграмм подтверждается и расчетами суммы абсолютных значений отклонений натуральных логарифмов измеренных значений выше НГДИ от теоретических значений: для Массива #1 значение этой суммы составляет 54,54, для Массива #2 – 38,43, а для Массива #3 – 15,46.

Использование подхода к анализу цензурированных данных об ОА радона в воздухе помещений, заключаю-

щегося в замене всех результатов ниже НГДИ на значение НГДИ, допустимо только в том случае, если трактовка результатов радонового обследования включает только разделение помещений или зданий на категории соответствующих и не соответствующих санитарным нормам. В иных же случаях, когда рассчитываются средние значения ОА радона для дальнейшей оценки доз внутреннего облучения за счет радона и показателей риска для здоровья населения [34, 35], использование такого подхода, равно как и простое отбрасывание всех результатов ниже НГДИ, представляется недопустимым, т.к. приводит к заметному завышению результатов: в рассмотренном примере завышение геометрического среднего составляет 1,3 раза в случае использования первого подхода и 2 раза в случае использования второго подхода (см. табл.).

Что касается плато, образующихся на Q-Q диаграммах (и соответствующих пиков на гистограммах частотного распределения) за счет присутствия в Массивах #1 и #3 значительного количества идентичных результатов после процедур подстановки, то их устранение не имеет практического значения, поскольку в данном случае (в отличие от рассмотренного в публикации [13]) стоит задача не восстановления формы распределения, а точной оценки его параметров при известном объеме цензурированных данных и известной НГДИ. Тем не менее, причина, по которой распределения оказываются немного усеченными слева, остается неизменной – это применение методик или типов СИ с относительно высокими НГДИ. В частности, для методики измерений, основанной на использовании твердотельных трековых детекторов радона на базе нитратцеллюлозной пленки LR-115 Type II, которая использовалась в рассмотренном радоновом обследовании, значение НГДИ может быть снижено до уровня порядка 14 Бк/м³ при увеличении времени экспозиции до 90 суток и до 7 Бк/м³ – при увеличении до 180 суток.

Следует также отметить, что проверка соответствия полученных результатов измерений логнормальному закону распределения в любом случае должна быть первым шагом в процедуре анализа результатов радонового обследования перед применением (при необходимости) любого метода анализа цензурированных данных, при этом ее вполне допустимо проводить по массиву, в котором результаты ниже НГДИ отброшены (см. рис. 2).

Заключение

Представленные в статье результаты тестового практического применения одного из наиболее точных, но при этом несложных с вычислительной точки зрения методов анализа цензурированных данных – метода бета-подстановки – показывают, что он подходит для использования в качестве элемента в процедуре обработки результатов радоновых обследований для минимизации смещения оценок параметров распределений значений ОА радона и может быть рекомендован для использования вместе с методом построения и анализа Q-Q диаграмм, применяемым для проверки соответствия полученных распределений логнормальному закону. В рассмотренном примере такие подходы к решению задачи учета цензурированных значений, как их замена на значение НГДИ или простое их отбрасывание, приводили к завышению значения геометрического среднего

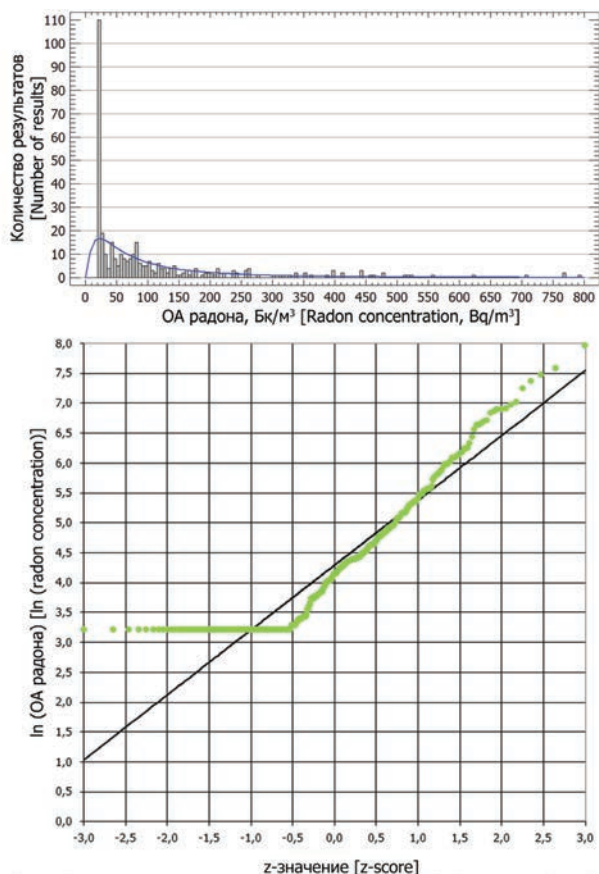


Рис. 1. Гистограмма частотного распределения (вверху) и Q-Q диаграмма (внизу) результатов измерений ОА радона в Массиве #1

[Fig. 1. Frequency distribution histogram (on the top) and Q-Q plot (in the bottom) of radon concentrations in Array #1]

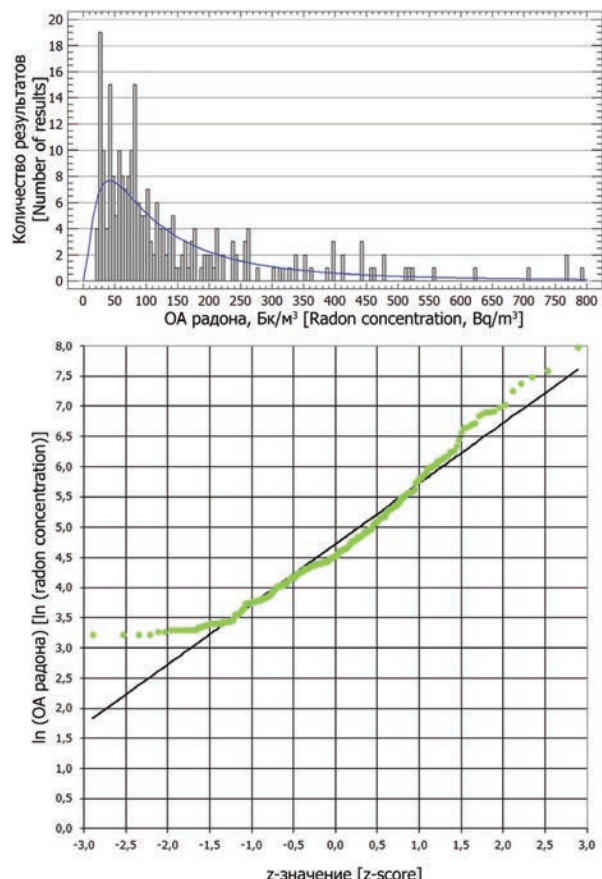


Рис. 2. Гистограмма частотного распределения (вверху) и Q-Q диаграмма (внизу) результатов измерений ОА радона в Массиве #2

[Fig. 2. Frequency distribution histogram (on the top) and Q-Q plot (in the bottom) of radon concentrations in Array #2]

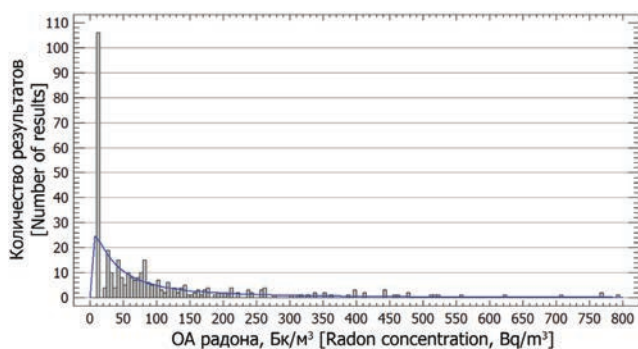


Рис. 3. Гистограмма частотного распределения (слева) и Q-Q диаграмма (справа) результатов измерений ОА радона в Массиве #3

[Fig. 3. Frequency distribution histogram (on the left) and Q-Q plot (in the right) of radon concentrations in Array #3]

распределения в 1,3 и 2 раза соответственно, по сравнению со значением, получаемым после применения метода бета-подстановки. Результаты визуального и количественного анализа Q-Q диаграмм позволяют сделать вывод о том, что оцененные параметры распределения, полученного после применения метода бета-подстановки, характеризуются минимальным смещением.

Реализация Указа Президента РФ от 13.10.2018 г. № 585 «Об утверждении Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу», в котором в качестве одного из основных направлений фигурирует «совершенствование государственного контроля (надзора) за воздействием на здоровье человека природных источников ионизирующего излучения, в том числе радона и продуктов его распада, в жилых домах, детских учреждениях, общественных и производственных зданиях», а также перспектива разработки региональных, а возможно, и национальной радоновых программ и планов действий по радону в рамках постепенного внедрения в практику современных рекомендаций МАГАТЭ, изложенных в Требовании 50 Международных основных норм безопасности [36], неизбежно приведут в ближайшем будущем к росту числа радоновых обследований в России на различных уровнях административно-территориального деления с использованием «контрольно-измерительных приборов для измерения содержания радона и продуктов его распада в жилых помещениях с применением интегральных методов», о чем прямо сказано в Указе. С учетом принятого курса на внедрение в практику санитарно-эпидемиологического надзора методологии оценки риска^{1,2,3,4}, а не простого разделения помещений и зданий на категории соответствующих и не соответствующих санитарным нормам, представляется весьма важным, чтобы при обработке результатов радоновых обследований, являющихся базой

для дальнейшей оценки рисков, применялись методы, позволяющие минимизировать смещение оценок параметров и статистических характеристик распределений значений ОА радона в воздухе помещений. Простота и эффективность описанного в статье метода анализа цензурированных данных должны способствовать его широкому внедрению в практику и, как следствие, повышению достоверности представляемых результатов радоновых обследований, в том числе точности оцениваемых доз внутреннего облучения населения радоном и различных показателей риска для здоровья населения.

Автор выражает признательность Т.А. Балабиной (ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева) за предоставленные архивные данные.

Литература

1. Маренный, А.М. Обследование зданий города Лесной на содержание радона в помещениях / А.М. Маренный, М.Е. Киселева, Н.А. Нефедов, Г.И. Сутягина, Л.Э. Карл // Радиационная гигиена. – 2018. – Т. 11, № 3. – С. 92–106.
2. Онищенко, А.Д. Влияние строительных характеристик зданий на накопление радона в детских дошкольных учреждениях Свердловской области / А.Д. Онищенко, А.В. Васильев, Г.П. Малиновский, М.В. Жуковский // Радиационная гигиена. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 28–36.
3. Романович, И.К. Результаты выборочного обследования содержания радона в помещениях детских дошкольных и школьных организаций Ленинградской области / И.К. Романович, И.П. Стамат, Т.А. Кормановская, Т.А. Балабина, Н.А. Королева, О.А. Историк, Л.А. Еремина // Здоровье населения и среда обитания. – 2017. – № 10 (295). – С. 46–49.
4. Поцелуев, Н.Ю. Гигиеническая оценка индивидуальных годовых доз природного облучения населения модельных территорий Алтайского края / Н.Ю. Поцелуев, И.П. Салдан, Б.А. Баландович, О.В. Околелова, С.П. Филиппова // Радиационная гигиена. – 2016. – Т. 9, № 3. – С. 28–35.

¹ 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)]

² 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)]

³ 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 г. «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 Rospotrebnadzor 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)]

⁴ 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)]

5. Маренный, А.М. Проведение обследований зданий различного назначения на содержание радона на территориях, обслуживаемых ФМБА России / А.М. Маренный, В.В. Романов, В.И. Астафуров, А.Т. Губин, С.М. Киселев, Н.А. Нефедов, А.В. Пенезев // Радиационная гигиена. – 2015. – Т. 8, № 1. – С. 23–29.
6. Маренный, А.М. Обследование города Краснокаменск на содержание радона в помещениях / А.М. Маренный, С.М. Киселев, А.В. Титов, С.Б. Золотухина, В.И. Астафуров, В.А. Дмитриев, Л.А. Журавлева, М.А. Маренный, Н.А. Нефедов, А.В. Пенезев, Е.А. Хохлова // Радиационная гигиена. – 2013. – Т. 6, № 3. – С. 47–52.
7. Longtin J.P. Occurrence of Radon, Radium, and Uranium in Groundwater. JAmWaterWorksAssoc. 1988 Jul;80(7):84–93.
8. Hecht H., Honikel K.O. Assessment of data sets containing a considerable number of values below the detection limits. Z Lebensm Unters Forsch. 1995 Dec;201(6):592–7.
9. Vlachonikolis I.G., Marriott F.H. Evaluation of censored contamination data. Food Addit Contam. 1995 Sep-Oct;12(5):637–44.
10. Дубнер, П.Н. Англо-русский статистический глоссарий: основные понятия: <http://masters.donntu.org/2002/fvti/spivak/library/book2/book2.htm> (дата обращения: 16.06.2019)
11. 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.
12. 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.
13. Кононенко, Д.В. Анализ распределений значений объемной активности радона в воздухе помещений в субъектах Российской Федерации / Д.В. Кононенко // Радиационная гигиена. – 2019. – Т. 12, № 1. – С. 85–103.
14. 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 // Матер. междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы радиационной гигиены», Санкт-Петербург, 23-24 октября 2018 г. – СПб., 2018. – С. 176–178.
15. Barry T.M., Brattin W.J. Distribution of Radon-222 In Community Groundwater Systems: Analysis of Type I Left-Censored Data with Single Censoring Point. Hum Ecol Risk Assess. 1998;4(2):579–603.
16. Burmaster D.E., Wilson A.M. Fitting second-order finite mixture models to data with many censored values using maximum likelihood estimation. Risk Anal. 2000 Apr;20(2):261–71.
17. 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):1557–653.
18. 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.
19. Hornung R.W., Reed L.D. Estimation of average concentration in the presence of nondetectable values. Appl Occup Environ Hyg. 1990;5(1):46–51.
20. Perkins J.L., Cutter G.N., Cleveland M.S. Estimating the mean, variance, and confidence limits from censored (<Limit of Detection), lognormally distributed exposure data. Am Ind Hyg Assoc J. 1990;51(8):416–19.
21. Finkelstein M.M., Verma D.K. Exposure estimation in the presence of nondetectable values: another look. AIHAJ. 2001 Mar-Apr;62(2):195–8.
22. Hewett P., Ganster G.H. A comparison of several methods for analyzing censored data. Ann Occup Hyg. 2007 Oct;51(7):611–32.
23. Sinha P., Lambert M.B., Trumbull V.L. Evaluation of statistical methods for left-censored environmental data with nonuniform detection limits. Environ Toxicol Chem. 2006 Sep;25(9):2533–40.
24. Schmoyer R.L., Beaucamp J.J., Brandt C.C., Hoffman F.O.Jr. Difficulties with the lognormal model in mean estimation and testing. Environ Ecol Stat. 1996 Mar;3(1):81–97.
25. She N. Analyzing censored water quality data using a nonparametric approach. J Am Water Res Assoc. 1997 Jun;33(3):615–24.
26. Busschaert P., Geeraerd A.H., Uyttendaele M., Van Impe J.F. Hierarchical Bayesian analysis of censored microbiological contamination data for use in risk assessment and mitigation. Food Microbiol. 2011 Jun;28(4):712–9.
27. Paulo M.J., van der Voet H., Jansen M.J., ter Braak C.J., van Klaveren J.D. Risk assessment of dietary exposure to pesticides using a Bayesian method. Pest Manag Sci. 2005 Aug;61(8):759–66.
28. Glass D.C., Gray C.N. Estimating mean exposures from censored data: exposure to benzene in the Australian petroleum industry. Ann Occup Hyg. 2001 Jun;45(4):275–82.
29. Ganster G.H., Hewett P. An accurate substitution method for analyzing censored data. J Occup Environ Hyg. 2010 Apr;7(4):233–44.
30. Huynh T., Ramachandran G., Banerjee S., Monteiro J., Stenzel M., Sandler D.P., Engel L.S., Kwok R.K., Blair A., Stewart P.A. Comparison of methods for analyzing left-censored occupational exposure data. Ann Occup Hyg. 2014 Nov;58(9):1126–42.
31. Huynh T., Quick H., Ramachandran G., Banerjee S., Stenzel M., Sandler D.P., Engel L.S., Kwok R.K., Blair A., Stewart P.A. A Comparison of the β -substitution method and a Bayesian method for analyzing left-censored data. Ann Occup Hyg. 2016 Jan;60(1):56–73.
32. Выполнение региональной программы «Радон» (Пушкинский и Красносельский районы): отчет заключительный по Договору № 24-02 от 06.06.2000 / СПбНИИРГ Минздрава России; рук. И.П. Стамат; исполн.: Крисюк Э.М., Терентьев Р.П., Королева Н.А., Балабина Т.А. – СПб., 2000. – 69 с.
33. 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.
34. 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.
35. Кононенко, Д.В. Оценка риска для здоровья населения субъектов Российской Федерации при равномерном пожизненном облучении радоном / Д.В. Кононенко, Т.А. Кормановская // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. – 2019. – № 1(21). – С. 56–61.
36. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности. Общие требования безопасности. Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 3. – Вена: МАГАТЭ, 2015. – 477 с. – ISBN 978-92-0-409915-7, ISSN 1020-5845.

Поступила: 25.06.2019 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. Использование метода бета-подстановки для анализа цензурированных данных об объемной активности радона в воздухе помещений // Радиационная гигиена. – 2019. – Т.12, № 4. – С. 47–55. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-47-55

Application of the β -substitution method for analyzing censored data on indoor radon concentrations

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

When analyzing the results of radon surveys, there could be an issue with measurements that are below the limit of detection (LOD) of the measurement technique used. This issue is usually referred to as the management of left-censored data. The paper presents the results of the practical application of one the most accurate and easy to calculate methods for analyzing censored data – the β -substitution method – to the analysis of an indoor radon concentrations dataset. The results of the radon survey conducted in the framework of the regional program “Radon” in Krasnoselskiy district of St. Petersburg in 2000 have been used as the test dataset. It is shown that inappropriate approaches to the management of the censored data, such as discarding the censored values or substituting them with the LOD value, can lead to considerably biased estimates of parameters or statistics of the resulting distributions. Further, this could result in an overestimation of doses and risk estimates which are based on the median values. The visual and quantitative analysis of Q-Q plots leads to conclusion that the estimated parameters of the distribution after the application of the β -substitution method are characterized by a minimum bias. The applied β -substitution method could be recommended for use as an element in the procedure of analyzing the results of radon surveys to minimize the bias of the estimates of the parameters of the radon concentration distributions alongside with Q-Q plots used to verify the conformity of radon concentrations with a lognormal distribution.

Key words: radon, concentration, censored data analysis, beta-substitution, β -substitution, lognormal distribution, distribution parameters, Q-Q plot, risk assessment.

References

1. Marennyy A.M., Kiseleva M.E., Nefedov N.A., Sutiagina G.I., Karl L.E. Survey of buildings in the city Lesnoy on the indoor radon concentration. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2018;11(3):92–106. (In Russian)
2. Onishchenko A.D., Vasilyev A.V., Malinovsky G.P., Zhukovsky M.V. Influence of building features on radon accumulation in kindergartens of the Sverdlovsk region. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2018;11(2):28–36. (In Russian)
3. Romanovich I.K., Stamat I.P., Kormanovskaya T.A., Balabina T.A., Koroleva N.A., Istorik O.A., Eremina L.A. Results of sampling analysis of radon content in preschool and school organizations in the Leningrad region. Zdorovye nasele-niya i sreda obitaniya = Public Health and Life Environment. 2017;10(295):46–9. (In Russian)
4. Potseluev N.Y., Saldan I.P., Balandovich B.A., Okolelova O.V., Filippova S.P. Annual individual hygienic assessment of natural exposure doses of the Altai territory model areas population. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2016;9(3):28–35. (In Russian)
5. Marennyy A.M., Romanov V.V., Astafurov V.I., Gubin A.T., Kiselev S.M., Nefedov N.A., Peneshev A.V. Survey for indoor radon in dwellings on the territories supervised by FMBA of Russia. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2015;8(1):23–9. (In Russian)
6. Marennyi A.M., Kiselev S.M., Titov A.V., Zolotukhina S.B., Astafurov V.I., Dmitriev V.A., Zhuravleva L.A., Marennyi M.A., Nefedov N.A., Penezhev A.V., Khokhlova E.A. Survey in Krasnokamensk city on the content of indoor radon. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2013;6(3):47–52. (In Russian)

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

7. Longtin J.P. Occurrence of Radon, Radium, and Uranium in Groundwater. *J Am Water Works Assoc.* 1988 Jul;80(7):84–93.
8. Hecht H., Honikel K.O. Assessment of data sets containing a considerable number of values below the detection limits. *Z Lebensm Unters Forsch.* 1995 Dec;201(6):592–7.
9. Vlachonikolis I.G., Marriott F.H. Evaluation of censored contamination data. *Food Addit Contam.* 1995 Sep-Oct;12(5):637–44.
10. Dubner P.N. English-Russian glossary on statistics: basic concepts. – Available from: <http://masters.donntu.org/2002/fvti/spivak/library/book2/book2.htm> (Accessed: 16.06.2019) (In Russian)
11. 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.
12. 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.
13. Kononenko D.V. Analysis of distributions of indoor radon concentrations in the regions of the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene.* 2019;12(1):85–103. (In Russian)
14. 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, pp. 176–178. (In Russian)
15. Barry T.M., Brattin W.J. Distribution of Radon-222 In Community Groundwater Systems: Analysis of Type I Left-Censored Data with Single Censoring Point. *Hum Ecol Risk Assess.* 1998;4(2):579–603.
16. Burmaster D.E., Wilson A.M. Fitting second-order finite mixture models to data with many censored values using maximum likelihood estimation. *Risk Anal.* 2000 Apr;20(2):261–71.
17. 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):1557–653.
18. 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.
19. Hornung R.W., Reed L.D. Estimation of average concentration in the presence of nondetectable values. *Appl Occup Environ Hyg.* 1990;5(1):46–51.
20. Perkins J.L., Cutter G.N., Cleveland M.S. Estimating the mean, variance, and confidence limits from censored (<Limit of Detection), lognormally distributed exposure data. *Am Ind Hyg Assoc J.* 1990;51(8):416–19.
21. Finkelstein M.M., Verma D.K. Exposure estimation in the presence of nondetectable values: another look. *AIHAJ.* 2001 Mar-Apr;62(2):195–8.
22. Hewett P., Ganster G.H. A comparison of several methods for analyzing censored data. *Ann Occup Hyg.* 2007 Oct;51(7):611–32.
23. Sinha P., Lambert M.B., Trumbull V.L. Evaluation of statistical methods for left-censored environmental data with nonuniform detection limits. *Environ Toxicol Chem.* 2006 Sep;25(9):2533–40.
24. Schmoyer R.L., Beaucamp J.J., Brandt C.C., Hoffman F.O.Jr. Difficulties with the lognormal model in mean estimation and testing. *Environ Ecol Stat.* 1996 Mar;3(1):81–97.
25. She N. Analyzing censored water quality data using a nonparametric approach. *J Am Water Res Assoc.* 1997 Jun;33(3):615–24.
26. Busschaert P., Geeraerd A.H., Uyttendaele M., Van Impe J.F. Hierarchical Bayesian analysis of censored microbiological contamination data for use in risk assessment and mitigation. *Food Microbiol.* 2011 Jun;28(4):712–9.
27. Paulo M.J., van der Voet H., Jansen M.J., ter Braak C.J., van Klaveren J.D. Risk assessment of dietary exposure to pesticides using a Bayesian method. *Pest Manag Sci.* 2005 Aug;61(8):759–66.
28. Glass D.C., Gray C.N. Estimating mean exposures from censored data: exposure to benzene in the Australian petroleum industry. *Ann Occup Hyg.* 2001 Jun;45(4):275–82.
29. Ganster G.H., Hewett P. An accurate substitution method for analyzing censored data. *J Occup Environ Hyg.* 2010 Apr;7(4):233–44.
30. Huynh T., Ramachandran G., Banerjee S., Monteiro J., Stenzel M., Sandler D.P., Engel L.S., Kwok R.K., Blair A., Stewart P.A. Comparison of methods for analyzing left-censored occupational exposure data. *Ann Occup Hyg.* 2014 Nov;58(9):1126–42.
31. Huynh T., Quick H., Ramachandran G., Banerjee S., Stenzel M., Sandler D.P., Engel L.S., Kwok R.K., Blair A., Stewart P.A. A Comparison of the β -substitution method and a Bayesian method for analyzing left-censored data. *Ann Occup Hyg.* 2016 Jan;60(1):56–73.
32. Stamat I.P., Krisyuk E.M., Terentiev R.P., Koroleva N.A., Balabina T.A. Implementation of the regional program “Radon” (Pushkin and Krasnoselsky districts): Final report under Contract No. 24-02 dated 06.06.2000. St.Petersburg: SPbNIIRG, Ministry of Health; 2000, 69 p. (In Russian)
33. 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.
34. 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)
35. Kononenko D.V., Kormanovskaya T.A. Risk assessment for the population of the regions of the Russian Federation from constant lifelong exposure to radon. *Mediko-biologicheskie problemy zhiznedeyatel'nosti = Medical and biological problems of life activity.* 2019;1(21):56–61. (In Russian)
36. Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards. IAEA safety standards series no. GSR Part 3. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2014, 436 p. ISSN 1020-525X.

Received: June 25, 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) ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1392-1226>

For citation: Kononenko D.V. Application of the β -substitution method for analyzing censored data on indoor radon concentrations. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene*, 2019, Vol.12, No 4, pp. 47–55. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-47-55

Проблема облучения радоном в зданиях повышенного класса энергоэффективности

И.В. Ярмошенко, Г.П. Малиновский, А.Д. Онищенко, А.В. Васильев

Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия

В настоящей статье представлен обзор международной научно-технической литературы по проблеме накопления радона в новых энергоэффективных зданиях и в домах, реконструированных с учетом требований энергосбережения. Энергоэффективность является важным условием перехода к экологически устойчивому развитию. Значительным потенциалом энергосбережения обладает жилищно-коммунальное хозяйство. В России строительство зданий наивысших классов энергоэффективности происходит ускоренными темпами и достигло в 2017 г. 75% от общего числа сданных в эксплуатацию многоквартирных домов. Внедрение современных технологий, снижающих теплопотери, сопровождается снижением кратности воздухообмена, что приводит к ухудшению качества воздуха помещений, в частности — к накоплению радона. В международной литературе приводятся примеры роста объемной активности радона в несколько раз после реконструкции здания, средняя объемная активность радона в модернизированных зданиях повышалась на 22–120%. В новых домах, построенных с соблюдением требований к энергосбережению, также может происходить значительное увеличение объемной активности радона по сравнению с домами низкого класса энергоэффективности. В отдельных помещениях, в том числе в России, обнаружено превышение санитарно-гигиенических нормативов. Облучение радоном жильцов энергоэффективных зданий в значительной степени определяется режимом содержания помещения. На основе данных обзора можно предполагать, что в условиях интенсивного строительства энергоэффективных зданий в России средний уровень облучения населения радоном может повыситься.

Ключевые слова: радон, энергоэффективность, вентиляция, микроклимат помещения.

Введение

Начиная с 1980–1990-х гг., в России и других странах мира энергосбережение и повышение энергетической эффективности рассматриваются в качестве важных условий, обеспечивающих устойчивое развитие общества. Глобальная необходимость снижения потребления энергии в экономике и других сферах человеческой деятельности обусловлена целым рядом причин. Человечество ускоренными темпами расходует запасы невозобновляемых энергоресурсов. Несмотря на то, что к настоящему времени израсходовано не более 40% имевшихся на Земле запасов углеводородов, разведанных месторождений угля хватит немногим более чем на 100 лет, нефти и газа – на 50 лет. Сжигание углеводородов на электростанциях является источником поступления в атмосферу большого количества поллютантов, в том числе большей части диоксида серы, оксидов азота, мышьяка и ртути антропогенного происхождения. Использование ископаемого топлива приводит к повышению содержания парниковых газов в атмосфере. Так, с начала XX в. концентрация CO₂ выросла с менее чем 300 до 400 ppm и при сохранении текущих темпов роста к 2050 г. превысит величину 450 ppm. Повышающаяся стоимость энергоресурс-

сов ложится тяжелым бременем на экономику, снижает темпы экономического роста, особенно в развивающихся странах. По данным исследований структуры расходов домохозяйств, оплата отопления составляет значительную часть трат наименее обеспеченных семей, снижая расходы на образование, медицинское обслуживание и другие социально важные нужды.

На строительство и эксплуатацию зданий в развитых странах расходуется около половины всей энергии. В общей структуре энергопотребления значительную долю занимает жилищно-коммунальное хозяйство – в развитых странах до 40%. По оценкам экспертов Правительства РФ, эта сфера экономики страны обладает наибольшим потенциалом энергосбережения [1]. Снижение энергопотребления и повышение энергоэффективности зданий является одной из задач стратегии энергетической эффективности Российской Федерации [2]. Основные потери в типовом многоквартирном жилом здании приходятся на горячее водоснабжение (47%) и на нагрев infiltrирующегося воздуха (31%). Теплопотери через ограждающие конструкции (стены, окна, крышу и пр.) составляют около 22%.

Увеличение доли многоквартирных зданий наивысших классов энергоэффективности происходит в России ускоренными темпами. Так, в 2017 г. из пример-

Малиновский Георгий Петрович

Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук

Адрес для переписки: 620990, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 20; E-mail: georgy@ecko.uran.ru

но 9000 введенных в эксплуатацию многоквартирных домов более 75% были отнесены к классам В, А, А+, А++ [2]. В значительном числе существующих зданий выполнена реконструкция с повышением класса энергоэффективности с применением соответствующих технологий, например замены окон.

Разработанные к настоящему времени меры по энергосбережению и снижению затрат на отопление зданий в значительной мере базируются на снижении потерь тепла через наружные ограждающие конструкции за счет теплопроводности и конвекции. Одним из основных методов ограничения теплопотребления является существенное снижение неконтролируемого воздухообмена с наружной атмосферой в пассивном режиме эксплуатации. Внедрение современных технологий, снижающих теплопотери, сопровождается определенной трансформацией микроклимата помещений. В частности, при снижении кратности воздухообмена (КВО) может происходить ухудшение качества воздуха помещений.

Среди вредных веществ, снижающих качество воздуха, особое место занимает радиоактивный газ радон. Основные закономерности поступления радона в здания подробно изучены [3–6]. Факторы, которые в комплексе обуславливают степень радоноопасности территорий и отдельных зданий, могут быть отнесены к одной из двух больших групп: геогенный радоновый потенциал и антропогенные факторы, включающие конструкцию здания и режим содержания помещений. В среде с низкой проницаемостью перенос радона происходит вследствие диффузии. В газопроницаемой среде необходимо учитывать перенос радона за счет градиента давления. В ситуации преимущественно диффузионного механизма поступления объемная активность (ОА) радона обратно пропорциональна КВО (рис. 1а). При конвективном поступлении соотношение свежего воздуха и воздуха, обогащенного радоном, в общем воздухообмене может нелинейно зависеть от КВО (рис. 1б). В общем случае в зданиях с пониженным воздухообменом ОА возрастает.

В настоящей статье представлен обзор опубликованных в международной научно-технической литературе результатов исследований накопления радона в домах, реконструированных с учетом требований энергосбережения, и в новых энергоэффективных зданиях. Выполнен анализ собранных литературных данных с целью выявить закономерности накопления радона в энергоэффективных зданиях и определить масштаб проблемы облучения населения радоном в условиях дальнейшего внедрения требований и стандартов энергосбережения в строительстве и жилищно-коммунальной сфере.

Изменение ОА радона в результате реконструкции зданий

При ремонте и реконструкции жилых зданий могут применяться следующие технические решения, повышающие энергосбережение с целью снижения затрат на отопление:

- замена окон, например установка пластиковых стеклопакетов;
- установка новых входных групп с плотными автоматически закрывающимися дверями и обустройством дополнительных тамбуров;
- дополнительная термоизоляция оболочки здания и др.

В некоторых странах при реконструкции зданий рекомендуется устанавливать механическую приточную вентиляцию с рекуперацией тепла.

Сравнение результатов измерений ОА радона в конкретных зданиях до и после реконструкции с повышением энергоэффективности проведено в Чехии [7]. С учетом высокого геогенного радонового потенциала большей части территории в этой стране уделяется значительное внимание проблеме защиты населения от радона и проводится большое число измерений. На рисунке 2 показаны примеры отдельных зданий, в которых были проведены повторные измерения с интервалом около 20 лет и выявлено значительное увеличение ОА радона. Во всех

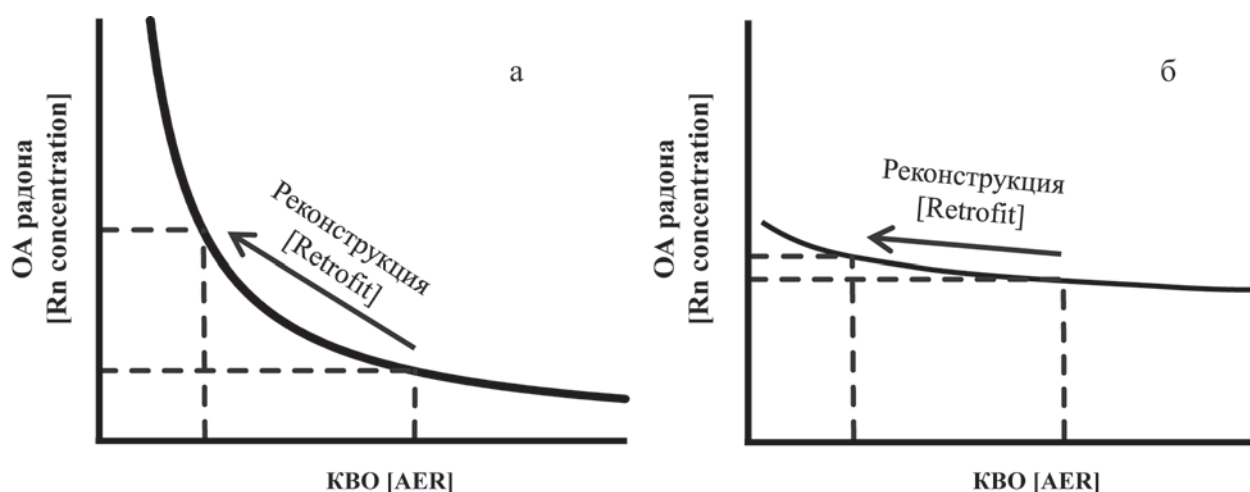


Рис. 1. Зависимость ОА радона от КВО при различных механизмах поступления радона: а – скорость поступления не зависит от КВО (диффузионный механизм), б – скорость поступления зависит от КВО

[Fig. 1. The dependence of radon concentration on the air exchange rate (AER) with different radon entry mechanisms: on the left – radon entry rate doesn't depend on the air exchange rate (diffusion mechanism), on the right – radon entry rate depends on the air exchange rate]

этих зданиях была проведена реконструкция с установкой новых пластиковых окон, а также сменились жильцы.

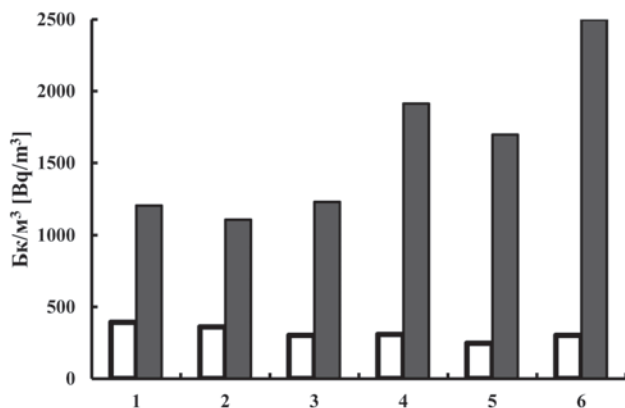


Рис. 2. ОА радона до реконструкции (левые столбцы) и после реконструкции с повышением энергоэффективности (правые столбцы) в некоторых зданиях в Чехии [7]

[Fig. 2. Radon concentration before reconstruction (left columns) and after reconstruction with energy efficiency increase (right columns) in some buildings in the Czech Republic [7]

В литературе представлены результаты сравнения средних значений ОА радона в выборках зданий без изменения класса энергоэффективности после возведения и реконструированных с повышением энергоэффективности (рис. 3). Как видно на рисунке 3, после проведения модернизации происходит увеличение средней ОА радона на 22–120%. Например, в детских дошкольных учреждениях Свердловской области с установленными пластиковыми стеклопакетами ОА радона составляет в среднем 87 Бк/м³, что в 1,6 выше, чем в зданиях с традиционными деревянными рамами [9]. В Чехии, также в детских учреждениях, замена окон и дополнительная теплоизоляция ограждающих конструкций привели к росту средней ОА также примерно в 1,6 раза [15].

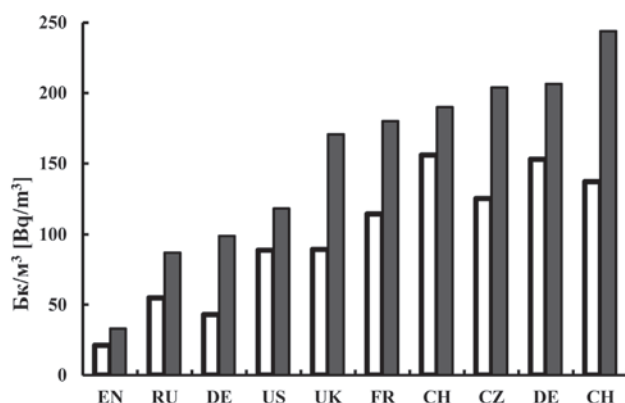


Рис. 3. Средняя ОА радона в выборках модернизированных (правые столбцы) и немодернизированных зданий (левые столбцы) в различных странах [8–17]

[Fig. 3. The average radon concentration in samples of retrofitted buildings (right columns) and non-retrofitted buildings (left columns) in different countries [8–17]

В Англии меры по снижению проницаемости оболочки односемейных домов привели к снижению неконтролируемой вентиляции в среднем примерно в 1,9 раза и увеличению ОА радона в 1,6 раза до 33 Бк/м³ [8], при этом в регионах повышенного радонового потенциала ОА радона в реконструированных зданиях в среднем достигала 170 Бк/м³ [12]. В США рост ОА радона на 33% до 118 Бк/м³ в среднем наблюдался в домах, вошедших в национальную программу энергосбережения, в зоне с повышенным геогенным радоновым потенциалом [11]. В то же время в зоне с наименьшим радоновым потенциалом ОА радона не изменилась (30 Бк/м³) [11]. Во Франции, по данным обследования, те или иные технические меры повышения теплосбережения были предприняты в более чем половине зданий, в том числе в 39% зданий были установлены пластиковые окна, что привело к увеличению ОА радона в среднем в 1,6 раза до 180 Бк/м³ (среднее геометрическое) [13]. Также рост ОА радона наблюдался в реконструированных домах в Швейцарии [14, 17] и Германии [16].

Показательным представляется пример радонового обследования сельских населенных пунктов на реке Теча в Курганской и Челябинской областях, выполненного в 2014–2015 гг. [18]. По результатам обследования 450 жилых домов (одноэтажных, одно- и двухсемейных) было обнаружено, что более чем в половине из них установлены новые пластиковые окна. В модернизированных домах, расположенных в геологической зоне пониженной проницаемости грунта, произошло увеличение ОА радона в среднем на 50% до 135 Бк/м³. При этом в геологической зоне с повышенной проницаемостью ОА радона почти не изменилась. Результаты обследования на реке Теча показывают различия изменения соотношения вкладов почвенного и атмосферного воздуха в общем воздухообмене здания при изменении КВО на различных территориях. Аналогичный результат получен в США при сравнении двух зон радонового потенциала [11].

В Литве и Финляндии было проведено сравнение величин ОА радона в многоквартирных зданиях, подвергшихся реконструкции с увеличением класса энергоэффективности, и нереконструированных зданиях [19]. При этом в Финляндии в зданиях устанавливалась также механическая приточная вентиляция с рекуперацией тепла. По результатам проведенного анализа в Литве наблюдалось увеличение ОА радона после повышения энергосбережения в 1,6 раза до 44 Бк/м³. В Финляндии в многоквартирных домах с механической вентиляцией ОА радона не изменилась (74 Бк/м³).

Таким образом, реконструкция зданий с целью снижения затрат на отопление приводит к определенному увеличению ОА радона. В отдельных зданиях наблюдался рост в несколько раз обратно пропорционально изменению КВО. В целом, изменение ОА радона происходило в разной степени в зависимости от условий поступления и соотношения вкладов диффузионного и конвективного механизмов переноса радона. Максимальный рост ОА радона можно ожидать при преимущественно диффузионном характере поступления. В опубликованных исследованиях средняя ОА радона в модернизированных зданиях повышалась не более чем на 80%.

ОА радона в новых зданиях с повышенным классом энергоэффективности

Повышение требований к энергосбережению во вновь возводимых зданиях является одним из основных положений стратегий энергоэффективности в различных странах. В России требования к строительству энергосберегающих зданий были впервые введены в 1996 г. Правила определения класса энергетической эффективности многоквартирных домов, утвержденные Минстроем РФ, установили базовые значения удельного годового расхода энергетических ресурсов в многоквартирных домах и требования по внедрению ключевых энергоэффективных технологий [1]. В Европейском Союзе принята Директива об энергоэффективности зданий (The Energy Performance in Buildings Directive), которая обязывает к 2021 г. перейти к возведению в европейских странах только зданий с нулевым потреблением энергии (near zero energy buildings). Директива определяет такие здания в широком смысле как здания с высокими показателями энергоэффективности. Воздухопроницаемость таких домов должна соответствовать скорости воздухообмена менее $0,6 \text{ ч}^{-1}$ при разности давлений 50 Па, обеспечиваемого контролируемой сбалансированной механической вентиляцией, при необходимости с рекуперацией тепла.

Сокращение энергопотребления в новых зданиях достигается такими архитектурно-строительными решениями, как применение монолитных бетонных и железобетонных конструкций в сочетании с использованием эффективных утеплителей, внешних изоляционных панелей и герметичных стеклопакетов, а также специальных требований к планировке. Кроме того, при проектировании здания может быть запланировано применение высокоэффективных систем отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха и водонагревательных систем.

В международной научно-технической литературе имеется меньшее количество публикаций результатов изучения накопления радона в новых домах, спроектированных и возведенных с учетом требований к энергосбережению, чем в реконструированных зданиях. Основные результаты сравнения ОА радона в выборках новых зданий и ранее возведенных домах представлены на рисунке 4. Как видно на рисунке 4, в приведенных примерах величина средней ОА радона во всех новых энергоэффективных зданиях выше, чем в подобранных авторами группах сравнения.

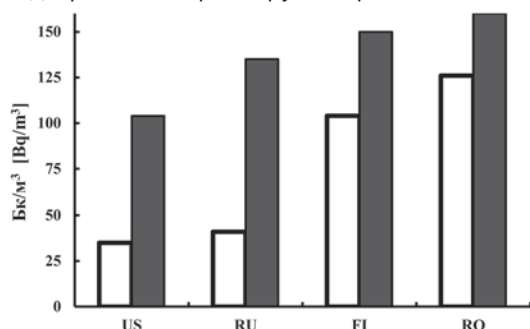


Рис. 4. Средняя ОА радона в выборках новых зданий, не оборудованных механической вентиляцией (правые столбцы), и зданий с пониженным классом энергоэффективности (левые столбцы) в различных странах [20–23]

[Fig. 4. The average radon concentration in samples of new buildings not equipped with mechanical ventilation (right columns) and buildings with low energy efficiency classes (left columns) in different countries [20–23]]

В России исследования проблемы радона в новых энергоэффективных зданиях проведены в г. Екатеринбурге [21, 24]. По результатам измерений в большой выборке, включавшей 65 жилых домов, средняя ОА радона составляет 135 Бк/м^3 в зданиях класса энергоэффективности В, В+, В++ [21]. Для заключения о степени увеличения ОА радона в новых зданиях проведено сравнение с результатами радонового обследования случайной выборки, в которую вошли здания различных типов. В этом обследовании было получено, что средняя ОА радона в пяти- и девятиэтажных панельных зданиях постройки 1960–1980-х гг. прошлого века, формирующих существенную часть жилого фонда г. Екатеринбурга, составляет 35 Бк/м^3 . Таким образом, применение энергоэффективных технологий строительства привело к почти трехкратному увеличению ОА радона в воздухе жилых помещений новых многоэтажных зданий по сравнению с домами подобной конструкции, построенными ранее. В исследованиях в г. Екатеринбурге было показано, что основной причиной роста содержания радона является снижение КВО в неконтролируемом пассивном режиме эксплуатации. При этом диффузионное поступление из материалов строительных конструкций является основным источником поступления радона в современных многоэтажных зданиях. Близкие результаты были получены в США (штат Нью-Йорк) при проведении измерений в односемейных одно-двухэтажных домах в начале 1980-х гг. [20]. В относительно небольшой выборке домов с низкой воздухопроницаемостью ограждающих конструкций ОА радона была выше почти в 3 раза, чем в других домах региона.

В Финляндии меры по системному увеличению энергоэффективности зданий начали применяться с 1980-х гг. В результате этих мер воздухопроницаемость односемейных домов снизилась с 7 ч^{-1} при разности давления 50 Па до 4 ч^{-1} в 2000 г. [22]. В 2003 г. начали вводиться новые строительные правила, повысившие требования к защите от поступления радона. Позже было установлено требование по оборудованию зданий механической приточно-вытяжной вентиляцией. С 2006 г. большинство новых односемейных зданий соответствуют требованиям защиты от радона и оборудованы необходимыми системами вентиляции. Такие подходы к регулированию в строительстве привели к соответствующим изменениям накопления ОА радона в зданиях. Если в домах, построенных в 1955–1964 гг., средняя ОА радона была 104 Бк/м^3 , к концу 1990-х гг. эта величина выросла до 150 Бк/м^3 , а в зданиях, построенных в 2006–2008 гг., средняя ОА радона снизилась до 95 Бк/м^3 [22]. Аналогичная картина наблюдалась в Норвегии [25], Австрии [26] и Швейцарии [27], в которых средняя ОА радона в новых односемейных домах, оборудованных механической приточно-вытяжной вентиляцией, была наименьшей по сравнению с группами зданий, построенных ранее.

В Румынии проведены измерения в одноэтажных домах, возведенных с учетом требований к энергосбережению, начиная с 2000 г., в регионе с высоким геогенным радоновым потенциалом. Было получено, что в новых зданиях ОА радона на 27% выше, чем в традиционных домах [23].

Таким образом, в новых домах, построенных с соблюдением требований к энергосбережению, при отсутствии механической приточно-вытяжной вентиляции происхо-

дит значительное увеличение ОА радона по сравнению с домами низкого класса энергоэффективности и с высокой проницаемостью оболочки здания. В северных регионах, например в Финляндии, где меры энергосбережения в частных домах применялись повсеместно и ранее, ОА радона увеличилась в меньшей степени. Изменение ОА радона в энергоэффективных зданиях также зависит от режима содержания помещений. По-видимому, в Румынии, стране с относительно теплым климатом, дома реже находятся в состоянии неконтролируемой пассивной вентиляции, и КВО в среднем выше, чем в аналогичных зданиях, построенных в северных регионах.

Роль антропогенных факторов в формировании радоновой обстановки в энергоэффективных зданиях

В целом ряде исследований показано, что ключевым фактором, влияющим на радоновую обстановку в зданиях с повышенным классом энергоэффективности, является снижение КВО в пассивном режиме эксплуатации здания, когда перекрыты пути естественного притока свежего воздуха и отключены другие системы вентиляции [3–5, 28]. При ожидаемой пониженной воздухопроницаемости и типичной разности давлений между внутренним объемом помещений и наружной атмосферой, равной 5 Па, воздухообмен в таких зданиях может снижаться ниже величины $0,1 \text{ ч}^{-1}$. По результатам анализа временных серий ОА радона в новых энергоэффективных зданиях в Екатеринбурге было показано, что в пассивном режиме эксплуатации средняя КВО составляет примерно $0,2 \text{ ч}^{-1}$ [29]. При этом в активном режиме при открытых форточках или окнах и периодически открываемых дверях обеспечивается доступ свежего воздуха и устанавливается КВО на комфортном для жителей уровне.

Для анализа влияния режима содержания помещения на ОА радона при различных уровнях неконтролируемого воздухообмена проведено моделирование накопления радона с шагом 1 ч. Пример двух модельных недельных серий ОА радона в зданиях с высоким и низким классом энергоэффективности показан на рисунке 5. Верхняя кривая на этом рисунке относится к энергоэффективному зданию, в котором КВО составляет $0,2$ и $1,0 \text{ ч}^{-1}$ в пассивном и активном режиме эксплуатации соответственно. Нижняя кривая соответствует временной серии ОА радона в здании с втрое большей КВО в пассивном режиме эксплуатации. Моделируется чисто диффузионный режим поступления с одинаковой скоростью в каждом из помещений и одновременной сменой пассивного и активного режимов эксплуатации жилищ. Как видно из представленной модели, только за счет низкого воздухообмена в здании высокого класса энергоэффективности происходит рост ОА радона более чем в 2 раза.

В реальных условиях может наблюдаться более сложный режим содержания жилых помещений. На рисунке 6 представлены трехдневные временные серии ОА радона, полученные с помощью радон-монитора в двух квартирах многоэтажного здания класса энергоэффективности В в г. Екатеринбурге. Видно, что в квартире №1, которой соответствует верхняя кривая, ОА радона в течение трех суток практически не менялась и находилась на относительно высоком уровне (выше 200 Бк/м^3), что свидетельствует об отсутствии активного проветривания. В квартире № 2

проветривание проводилось регулярно, и ОА радона периодически снижалась до уровня ниже 50 Бк/м^3 . Анализ продолжительных временных серий ОА радона показал, что скорость поступления радона в квартирах этого здания одинаковая.

На рисунке 7 показан пример трехдневной вре-

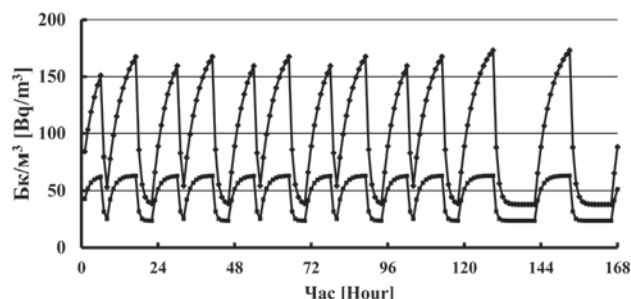


Рис. 5. Моделирование временной серии ОА радона с шагом 1 ч в здании с КВО в пассивном режиме $0,2 \text{ ч}^{-1}$ (верхняя кривая) и $0,6 \text{ ч}^{-1}$ (нижняя кривая)

[Fig. 5. Simulation of radon time series with 1 hour increment in a building with the air exchange rate in passive mode 0.2 h^{-1} (upper curve) and 0.6 h^{-1} (lower curve)]

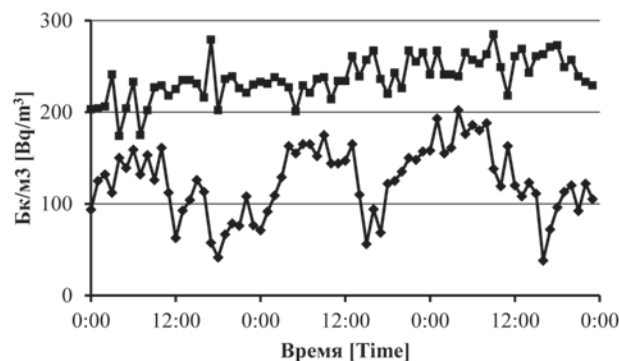


Рис. 6. Временные серии ОА радона, измеренной с помощью радон-монитора с интервалом в 1 ч, в квартире № 1 (верхняя кривая) и квартире № 2 (нижняя кривая)

[Fig. 6. The time series (1 hour increment) of radon concentration values measured with a radon monitor in apartment No. 1 (upper curve) and apartment No. 2 (lower curve)]

менной серии в квартире, в которой была обнаружена максимальная ОА радона для многоквартирных домов г. Екатеринбурга. Многоэтажный монолитный дом относится к классу энергоэффективности В. Среднегодовая ОА радона в квартире составляла 370 Бк/м^3 . Для выяснения причин повышенного накопления радона были проведены измерения с использованием радон-монитора и отобрана проба материалов строительных конструкций. Анализ временной серии показал, что проветривание в помещении проводится регулярно. Минимальная КВО, соответствующая пассивному режиму эксплуатации, составила $0,12 \text{ ч}^{-1}$. Удельная активность радия-226 в образцах бетона межэтажного перекрытия составила 90 Бк/кг . Согласно исследованиям естественной радиоактивности строительных материалов, применяемых в

городе Екатеринбурге, средняя удельная активность радия-226 в монолитном бетоне была 55 Бк/кг [30]. Таким образом, максимально наблюдавшаяся ОА радона в квартире многоквартирного здания была обусловлена сочетанием двух факторов: низкой КВО в пассивном режиме и относительно высокой удельной активностью радия-226 в строительных материалах.



Рис. 7. Временная серия ОА радона, измеренной с помощью радон-монитора с интервалом в 1 ч, в квартире с максимальной измеренной ОА радона

[Fig. 7. The time series (1 hour increment) of radon concentration values measured with a radon monitor in apartment with maximum radon concentration]

Одной из тенденций в современной урбанизированной среде является коттеджное строительство в пригородах крупных городов. Как показывает пример России и других стран, в индивидуальном строительстве предъявляются высокие требования к энергосбережению и организации вентиляции помещений. Правильно спроектированные и устроенные системы приточно-вытяжной вентиляции обеспечивают как энергетическую эффективность дома, так и комфортный микроклимат. В то же время при проектировании, монтаже и эксплуатации вентиляционных систем могут возникать ошибки, неисправности и отказы. Примеры влияния ошибок проектирования и отказов систем вентиляции, созданных по индивидуальным проектам, на накопление радона в современных односемейных домах приведены на рисунке 8. В коттедже № 1 (рис. 8а) при открытой двери в подвального помещения происходит подсос воздуха, содержащего высокую ОА радона, в жилые помещения. В коттедже № 2 (рис. 8б) происходит периодическое отключение системы вентиляции подвального помещения, и радон также поступает в жилые помещения. В этих случаях в обоих коттеджах происходил резкий рост ОА радона на два порядка величины. Необходимо отметить, что в рассмотренных примерах источником радона является грунт под зданием. Обнаруженные экстремально высокие значения ОА радона, по-видимому, связаны с высоким геогенным радоновым потенциалом территории. Тем не менее, в условиях низкого геогенного потенциала ошибки в проектировании системы вентиляции также могут привести к увеличению поступления радона за счет активации конвективного переноса в системе грунт – здание.

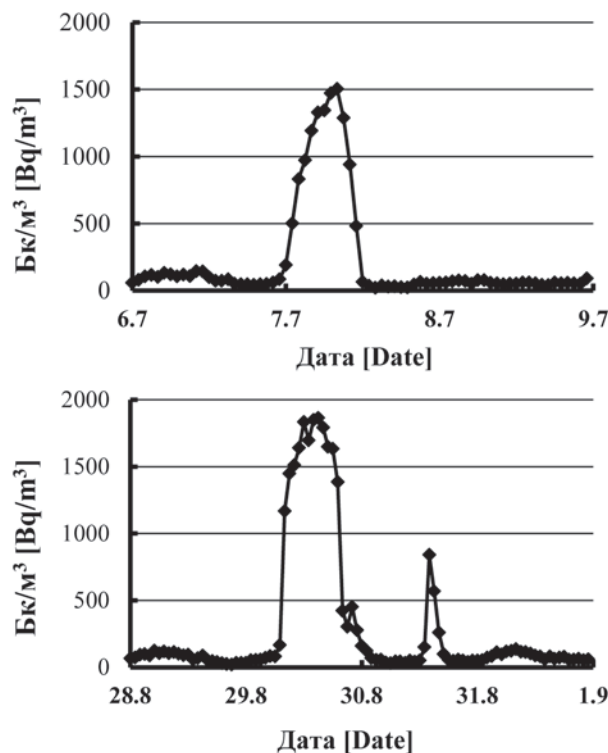


Рис. 8. Временная серия ОА радона, измеренной с помощью радон-монитора с интервалом в 1 ч, в: а) коттедже № 1 и б) коттедже № 2

[Fig. 8. The time series (1 hour increment) of radon concentration values measured with a radon monitor in a) cottage No. 1 and b) cottage No. 2]

В г. Екатеринбурге было проведено исследование накопления радона в многоквартирном доме с наивысшим классом энергоэффективности А [21]. Отопление в доме осуществляется с помощью теплых электрических полов. В доме смонтирована общедомовая система механической вентиляции с рекуперацией тепла и отсутствует центральное паровое отопление. Вентилирование квартир регулируют жильцы. По результатам мониторирующих измерений, среднее значение ОА радона в обследованной квартире составило 130 Бк/м³, что близко среднему значению ОА радона в зданиях классов энергоэффективности В, В+, В++. Обследование этого дома показало, что в условиях относительно холодного климата Среднего Урала применение современных систем вентиляции не дает очевидного преимущества с точки зрения качества микроклимата помещений. Как указано в работе [21], зачастую требуемый воздухообмен не обеспечивается жильцами как по соображениям комфорта (в холодное время года), так и по соображениям экономии электроэнергии (в случае применения приточно-вытяжных систем вентиляции).

Таким образом, уровни облучения радоном жильцов энергоэффективных зданий в значительной степени определяются такими антропогенными факторами, как режим содержания помещения, продолжительность пассивного режима вентиляции, частота проветривания в активном режиме. В зданиях, оборудованных системами приточно-вытяжной вентиляции, могут возникать ситуации с резким ростом поступления радона при некорректной работе или отключении системы.

Заключение

Проанализированные данные научной литературы говорят о том, что проблеме накопления радона в энергоэффективных зданиях в мире уделяется определенное внимание. На большом количестве примеров показано, что как реконструкция существующих зданий с увеличением класса энергоэффективности, так и строительство новых энергосберегающих зданий приводит к относительному увеличению ОА радона в воздухе жилищ. В ряде случаев рост может быть многократным обратно пропорционально снижению КВО. В том числе в отдельных помещениях обнаружено превышение санитарно-гигиенических нормативов.

В ряде развитых стран мира для снижения ОА радона в энергоэффективных зданиях с пониженной проницаемостью ограждающих конструкций успешно используется приточно-вытяжная вентиляция с рекуперацией тепла. В то же время опыт показывает, что решение проблемы облучения радоном в энергоэффективных зданиях на основе применения таких систем вентиляцией является неполным. Подобные сложные технические системы подвержены отказам, и их функционирование зависит от повседневной деятельности человека, нерегулярно и не в равной степени влияющего на воздушно-тепловое состояние помещений в своем жилище.

С учетом того, что повышение энергоэффективности жилищно-коммунального хозяйства является целью стратегии энергоэффективности в РФ, доля зданий с условиями для повышенного накопления радона будет увеличиваться. На основе полученных данных можно говорить о том, что в условиях интенсивного строительства новых энергоэффективных зданий может происходить увеличение среднего уровня облучения радоном населения отдельных регионов России. Такая тенденция будет противоречить принципу оптимизации радиационной безопасности.

Накопленные в мире данные по проблеме облучения населения радоном при внедрении энергосберегающих технологий в строительстве и при эксплуатации зданий имеют ряд ограничений. Большая часть экспериментальных данных относятся к односемейным малоэтажным домам, в которых происходит преимущественно конвективный перенос почвенного воздуха в системе грунт – подвал – жилые помещения. Недостаточное внимание уделяется многоэтажному строительству. В то же время в таком типе зданий в связи с преимущественно диффузионным механизмом поступления радона из строительных конструкций наблюдается наибольший рост ОА радона. В России данная ситуация потенциально затрагивает значительную часть городского населения.

Ограниченность имеющихся данных делает актуальным развитие исследований по разработке основ защиты человека от радона в условиях энергосберегающей урбанизированной среды. Целью таких исследований может быть дальнейшее формирование междисциплинарного научного задела на основе решения следующих задач: 1) обследование представительного числа помещений в зданиях различного класса энергоэффективности в различных климатических зонах; 2) экспериментальное изучение закономерностей поступления и накопления радона в типичных жилищах энергоэффективных зданий;

3) изучение архитектурно-строительных, поведенческих и других факторов, влияющих на формирование радоновой обстановки помещений энергоэффективных зданий; 4) прогнозирование степени актуальности проблемы облучения радоном как фактора радиационного риска для здоровья человека при различных сценариях развития строительного сектора.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00191).

Литература

1. Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации в 2017 году. – М.: Министерство экономического развития Российской Федерации, 2018.
2. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года: утв. распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р.
3. Крисюк, Э.М. Радиационный фон помещений / Э.М. Крисюк. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 120 с.
4. Nazaroff, W.W. Radon transport from soil to air, Rev. Geophys., 1992, Vol. 30, pp. 137–160.
5. Sherman, M.H. Simplified Modeling for Infiltration and Radon Entry. Lawrence Berkeley National Laboratory, 1998. LBL-31305.
6. Киселев, С.М. Радон: От фундаментальных исследований к практике регулирования / С.М. Киселев, М.В. Жуковский, И.П. Стамат [и др.] – М.: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2016. – 432 с.
7. Slezakova M., Navratilova Rovenska K., Tomasek L. [et al.] Short- and long-term variability of radon progeny concentration in dwellings in the Czech Republic. Radiat. Prot. Dosimetry, 2013, Vol. 153(3), pp. 334–341.
8. Milner J., Shrubsole C., Das P. [et al.] Home energy efficiency and radon related risk of lung cancer: modelling study. BMJ, 2014, Vol. 348, pp. 1–12.
9. Онищенко, А.Д. Влияние строительных характеристик зданий на накопление радона в детских дошкольных учреждениях Свердловской области / А.Д. Онищенко, А.В. Васильев, Г.П. Малиновский [и др.] // Радиационная гигиена. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 28–36.
10. Meyer, W. Impact of constructional energy saving measures on radon levels indoors. Indoor Air, 2019, Vol. 29, pp. 680–685.
11. Pigg S., Cautley D., Francisco P.W. Impacts of weatherization on indoor air quality: A field study of 514 homes. Indoor Air, 2018, Vol. 28, pp. 307–317.
12. Symonds P., Rees D., Daraktchieva Z., McColl N., Bradley J., Hamilton I., Davies M. Home energy efficiency and radon: An observational study. Indoor Air, 2019 (в печати).
13. Collignan B., Ponner E.Le, Mandin C. Relationships between indoor radon concentrations, thermal retrofit and dwelling characteristics. J. Environ. Radioact., 2016, Vol. 165, pp. 124–130.
14. Pampuri L., Caputo P., Valsangiacomo C. Effects of buildings' refurbishment on indoor air quality. Results of a wide survey on radon concentrations before and after energy retrofit interventions. Sustainable Cities and Society, 2018, Vol. 42, pp. 100–106.
15. Fojtikova I., Navratilova Rovenska K. Influence of energy-saving measures on the radon concentration in some kindergartens in the Czech Republic. Radiat. Prot. Dosimetry, 2014, Vol. 160, pp. 149–153.
16. Hoffmann, M. [et al.] Radon und Gebäudesanierung. Fachgespräch Radon. BfS (2012).
17. Burkart W., Wemli C., Brunner H.H. Matched pair analysis of the influence of weather-stripping on indoor radon concen-

- tration in Swiss dwellings. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 1984, Vol. 7(1-4), pp. 299–302.
18. Yarmoshenko I., Malinovsky G., Vasilyev A. [et al.] Geogenic and anthropogenic impacts on indoor radon in the Tеча River region. *Science of the Total Environment*, 2016, Vol. 571, pp. 1298–303.
 19. Du L., Leivo V., Prasauskas T. [et al.] Effects of energy retrofits on Indoor Air Quality in multifamily buildings. *Indoor Air*, 2019, Vol. 29 (4), pp. 686–697.
 20. Fleischer R.L., Mogro-Campero A., Turner L.G. Indoor radon levels in the northeastern U.S.: effects of energy-efficiency in homes. *Health Physics*, 1983, Vol. 45(2), pp. 407–412.
 21. Васильев, А.В. Радонная безопасность современных многоквартирных зданий различных классов энергетической эффективности / А.В. Васильев, И.В. Ярмошенко, М.В. Жуковский // *Радиационная гигиена*. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 80–84.
 22. Arvela H., Holmgren O., Reisbacka H. Radon prevention in new construction in Finland: a nationwide sample survey in 2009. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 2012, Vol. 148, pp. 465–474.
 23. Cucos (Dinu) A., Dicu T., Cosma C. Indoor radon exposure in energy-efficient houses from Romania. *Rom. Journ. Phys.*, 2015, Vol. 60 (9-10), pp. 1574–1580.
 24. Vasilyev A.V., Yarmoshenko I.V., Zhukovsky M.V. Low air exchange rate causes high indoor radon concentration in energy-efficient buildings. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 2015, Vol. 164(4), pp. 601–605.
 25. Finne I.E., Kolstad T., Larsson M. Significant reduction in indoor radon in newly built houses. *J. Environ. Radioact.*, 2019, Vol. 196, pp. 259–263.
 26. Ringer, W. Monitoring trends in civil engineering and their effect on indoor radon. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 2014, Vol. 160(1-3), pp. 38–42.
 27. Goyette Pernot J., Hager-Jörin C., Pampuri L. Indoor radon and air quality investigations in new or renovated energy-efficient Swiss single-family dwellings. *PLEA 2015 – Architecture in revolution* September 2015, Bologna, Italy.
 28. Nero A.V., Boegel M.L., Hollowell C.D., Ingersoll J.G. and Nazaroff W.W. Radon concentrations and infiltration rates measured in conventional and energy-efficient houses. *Health Phys.*, 1983, Vol. 45(2), pp. 401–405.
 29. Yarmoshenko I.V., Vasilyev A.V., Onishchenko A.D., Kiselev S.M., Zhukovsky M.V. Indoor radon problem in energy efficient multi-storey buildings. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 2014, Vol. 160(1-3), pp. 53–56.
 30. Васильев, А.В. Строительные материалы как источник радона в зданиях, построенных по современным технологиям / А.В. Васильев, М.В. Жуковский, А.Д. Онищенко, А.А. Вишневский // *Строительные материалы*. – 2013. – № 4. – С. 104–107.

Поступила: 22.05.2019 г.

Ярмошенко Илья Владимирович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, заместитель директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института промышленной экологии Уральского отделения Российской Академии наук, Екатеринбург, Россия

Малиновский Георгий Петрович – кандидат биологических наук, научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института промышленной экологии Уральского отделения Российской Академии наук. **Адрес для переписки:** 620990, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 20; E-mail: georgy@ecko.uran.ru

Онищенко Александра Дмитриевна – кандидат биологических наук, научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института промышленной экологии Уральского отделения Российской Академии наук, Екатеринбург, Россия

Васильев Алексей Владимирович – кандидат технических наук, заведующий радиационной лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института промышленной экологии Уральского отделения Российской Академии наук, Екатеринбург, Россия

Для цитирования: Ярмошенко И.В., Малиновский Г.П., Онищенко А.Д., Васильев А.В. Проблема облучения радоном в зданиях повышенного класса энергоэффективности // *Радиационная гигиена*. – 2019. – Т. 12, № 4. – С. 56–65. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-56-65

Problem of radon exposure in energy-efficient buildings: a review

Ilya V. Yarmoshenko, Georgy P. Malinovsky, Aleksandra D. Onishchenko, Aleksey V. Vasilyev

Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

The paper presents an overview of the international scientific and technical publications on a problem of radon accumulation in new energy efficient buildings and in houses reconstructed according to requirements of energy saving. Energy efficiency is an important requirement of the environmentally sustainable development. Housing and communal services have significant potential for energy saving. In Russia, the construction of highest energy efficiency classes buildings occurs at an accelerated rate and reached 75% of all multi-apartment houses built in 2017. The applying of modern technologies that reduce heat loss is accompanied by a decrease in the air exchange rate, which leads to deterioration of indoor air quality, in particular, the accumulation of radon. In the international literature, there are examples of the several times growth of radon concentration after the reconstruction of the building, the average radon concentration in retrofitted buildings increased by 22–120%. In new houses built to meet energy saving requirements, there can also be a significant increase in radon concentration compared to low-energy efficiency classes houses. Excess of sanitary and hygienic norms was found in some countries, including Russia. Radon exposure of dwellers of energy-efficient buildings is largely determined by the living habits. Based on the review data, it can be assumed that the average level of Russian population exposure to radon can increase under conditions of intensive construction of energy-efficient buildings.

Key words: radon, energy efficiency, ventilation, indoor air quality.

References

1. State report on the state of energy conservation and energy efficiency in the Russian Federation in 2017. Moscow: Ministry of Economic Development of the Russian Federation; 2018. (In Russian)
2. Energy strategy of Russia for the period up to 2030 (approved by decree of the Government of the Russian Federation dated November 13, 2009 N 1715-p) (In Russian)
3. Krisyuk E.M. Radiation background of premises. Moscow, Energoatomizdat, 1989, 120 p. (In Russian)
4. Nazaroff, W.W. Radon transport from soil to air, Rev. Geophys., 1992, Vol. 30, pp. 137–160.
5. Sherman M.H. Simplified Modeling for Infiltration and Radon Entry. Lawrence Berkeley National Laboratory, 1998. LBL-31305.
6. Kiselev S.M., Zhukovsky M.V., Stamat I.P., Yarmoshenko I.V. Radon: From fundamental research to regulation practice. Moscow, Publishing house «FGBU SRC Burnasyan FMBC, FMBA of Russia», 2016, 432 p. (in Russian)
7. Slezakova M., Navratilova Rovenska K., Tomasek L. [et al.] Short- and long-term variability of radon progeny concentration in dwellings in the Czech Republic. Radiat. Prot. Dosimetry, 2013, Vol. 153(3), pp. 334–341.
8. Milner J., Shrubsole C., Das P. [et al.] Home energy efficiency and radon related risk of lung cancer: modelling study. BMJ, 2014, Vol. 348, pp. 1–12.
9. Onishchenko A.D., Vasilyev A.V., Malinovsky G.P., Zhukovsky M.V. Influence of building features on radon accumulation in kindergartens of the Sverdlovsk region. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2018;11(2):28–36. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-2-28-36>
10. Meyer, W. Impact of constructional energy saving measures on radon levels indoors. Indoor Air, 2019, Vol. 29, pp. 680–685.
11. Pigg S., Cautley D., Francisco P.W. Impacts of weatherization on indoor air quality: A field study of 514 homes. Indoor Air, 2018, Vol. 28, pp. 307–317.
12. Symonds P., Rees D., Daraktchieva Z., McColl N., Bradley J., Hamilton I., Davies M. Home energy efficiency and radon: An observational study. Indoor Air, 2019 (в печати).
13. Collignon B., Ponner E., Le, Mandin C. Relationships between indoor radon concentrations, thermal retrofit and dwelling characteristics. J. Environ. Radioact., 2016, Vol. 165, pp. 124–130.
14. Pampuri L., Caputo P., Valsangiacomo C. Effects of buildings' refurbishment on indoor air quality. Results of a wide survey on radon concentrations before and after energy retrofit interventions. Sustainable Cities and Society, 2018, Vol. 42, pp. 100–106.
15. Fojtikova I., Navratilova Rovenska K. Influence of energy-saving measures on the radon concentration in some kindergartens in the Czech Republic. Radiat. Prot. Dosimetry, 2014, Vol. 160, pp. 149–153.
16. Hoffmann, M. [et al.] Radon und Gebäudesanierung. Fachgespräch Radon. BfS (2012).
17. Burkart W., Wemli C., Brunner H.H. Matched pair analysis of the influence of weather-stripping on indoor radon concentration in Swiss dwellings. Radiat. Prot. Dosimetry, 1984, Vol. 7(1-4), pp. 299–302.
18. Yarmoshenko I., Malinovsky G., Vasilyev A. [et al.] Geogenic and anthropogenic impacts on indoor radon in the Techa River region. Science of the Total Environment, 2016, Vol. 571, pp. 1298–303.
19. Du L., Leivo V., Prasauskas T. [et al.] Effects of energy retrofits on Indoor Air Quality in multifamily buildings. Indoor Air, 2019, Vol. 29 (4), pp. 686–697.
20. Fleischer R.L., Mogro-Campero A., Turner L.G. Indoor radon levels in the northeastern U.S.: effects of energy-efficiency in homes. Health Physics, 1983, Vol. 45(2), pp. 407–412.
21. Vasilyev A.V., Yarmoshenko I.V., Zhukovsky M.V. Radon safety of modern multi-storey buildings with different energy efficiency classes. Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene, 2018, Vol. 11, No 1, pp. 80–84. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-1-80-84.

Georgy P. Malinovsky

Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

Address for correspondence: Sofia Kovalevskaya str., 20, Ekaterinburg, 620990, Russia; E-mail: georgy@ecko.uran.ru

22. Arvela H., Holmgren O., Reisbacka H. Radon prevention in new construction in Finland: a nationwide sample survey in 2009. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 2012, Vol. 148, pp. 465–474.
23. Cucuș (Dinu) A., Dicu T., Cosma C. Indoor radon exposure in energy-efficient houses from Romania. *Rom. Journ. Phys.*, 2015, Vol. 60 (9-10), pp. 1574–1580.
24. Vasilyev A.V., Yarmoshenko I.V., Zhukovsky M.V. Low air exchange rate causes high indoor radon concentration in energy-efficient buildings. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 2015, Vol. 164(4), pp. 601–605.
25. Finne I.E., Kolstad T., Larsson M. Significant reduction in indoor radon in newly built houses. *J. Environ. Radioact.*, 2019, Vol. 196, pp. 259–263.
26. Ringer, W. Monitoring trends in civil engineering and their effect on indoor radon. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 2014, Vol. 160(1-3), pp. 38–42.
27. Goyette Pernot J., Hager-Jörin C., Pampuri L. Indoor radon and air quality investigations in new or renovated energy-efficient Swiss single-family dwellings. *PLEA 2015 – Architecture in revolution September 2015*, Bologna, Italy.
28. Nero A.V., Boegel M.L., Hollowell C.D., Ingersoll J.G. and Nazaroff W.W. Radon concentrations and infiltration rates measured in conventional and energy-efficient houses. *Health Phys.*, 1983, Vol. 45(2), pp. 401–405.
29. Yarmoshenko I.V., Vasilyev A.V., Onishchenko A.D., Kiselev S.M., Zhukovsky M.V. Indoor radon problem in energy efficient multi-storey buildings. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 2014, Vol. 160(1-3), pp. 53–56.
30. Vasilyev A.V., Zhukovsky M.V., Onishchenko A.D., Vishnevsky A.A. Building materials as a radon source in buildings constructed with modern technologies. *Stroitelnyye materialy = Construction Materials*, 2013, Vol. 4, pp. 104–107. (In Russian)

Received: May 22, 2019

Ilya V. Yarmoshenko – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Director, Senior Researcher, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

For correspondence: Georgy P. Malinovsky – Candidate of Biological Science, Researcher, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Sofia Kovalevskaya str., 20, Ekaterinburg, 620990, Russia; E-mail: georgy@ecko.uran.ru)

Aleksandra D. Onishchenko – Researcher, Institute of Industrial Ecology of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Aleksey V. Vasilyev – Candidate of Technical Sciences, Head of Radiation Lab, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

For citation: Yarmoshenko I.V., Malinovsky G.P., Onishchenko A.D., Vasilyev A.V. Problem of radon exposure in energy-efficient buildings: a review. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2019, Vol. 12, No. 4, pp. 56-65. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-56-65

Оценка мощности эквивалентной дозы гамма-излучения на открытой местности территории города Воронежа

М.И. Чубирко^{1,2}, О.В. Клепиков^{1,3}, С.А. Куролап⁴, М.К. Кузмичев^{1,2}, Е.М. Студеникина^{1,2}

¹Центр гигиены и эпидемиологии в Воронежской области, Воронеж, Россия

²Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко Минздрава РФ, Воронеж, Россия

³Воронежский государственный университет инженерных технологий Министерства науки и высшего образования РФ, Воронеж, Россия

⁴Воронежский государственный университет
Министерства науки и высшего образования РФ, Воронеж, Россия

Целью исследования являлось выявление закономерностей распределения величины мощности эквивалентной дозы гамма-излучения на открытой местности городского пространства в зависимости от функционального назначения внутригородской территории и типа её искусственного покрытия. Материалы и методы. Измерения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения (гамма-фона) на территории города Воронежа проведены в 70 точках, условно классифицированных по функциональному использованию (промышленная территория, транспортная территория, территория жилой застройки, рекреационная территория), а также по типу покрытия на открытой местности (гранитная брусчатка, асфальтовое покрытие, тротуарная плитка, открытый грунт). Для проведения радиационного контроля использовался высокочувствительный компактный поисковый прибор — измеритель-сигнализатор поисковый микропроцессорный ИСП-РМ1401МА. Для оценки достоверности различий средних величин показателя по функциональным внутригородским зонам и типам искусственного покрытия применены методы параметрической статистики (критерий Стьюдента). Параметрические методы статистики по сравнению с непараметрическими методами позволяют статистически однозначно интерпретировать полученные результаты. В этой связи нет необходимости использовать другие статистические инструменты. Результаты. Результаты оценки радиационного фона показывают, что мощность эквивалентной дозы гамма-излучения (гамма-фона) на территории города Воронежа составляет от 0,06 до 0,14 мкЗв/ч и не превышает допустимого значения (0,3 мкЗв/ч). Достоверных различий средних значений показателей в промышленной, транспортной, жилой функциональных зонах по отношению к рекреационной не выявлено ($t_{расч.} < t_{табл.}$, $p < 0,05$). Максимальные уровни гамма-фона (0,09–0,14 мкЗв/ч) на территории города Воронежа отмечались в тех местах, где для благоустройства территории использовались обработанные природные камни (гранит). При решении задачи выявления зависимости показателя мощности эквивалентной дозы гамма-излучения на открытой местности внутригородского пространства от типа покрытия для снижения неопределенностей в перспективе необходимо учитывать рецептуру материалов, особенно долю гранитной крошки.

Ключевые слова: мощность эквивалентной дозы гамма-излучения, открытая местность, городская территория.

Введение

Обеспечение радиационной безопасности населения всегда являлось и является одной из приоритетных составляющих национальной безопасности Российской Федерации и важнейшим элементом санитарно-эпидемиологического благополучия населения страны [1]. Данные радиационно-гигиенической паспортизации и ЕСКИД, функционирующей на базе Санкт-Петербургского НИИ радиационной гигиены имени про-

фессора П.В. Рамзаева, убедительно свидетельствуют о ведущем вкладе в структуру коллективной дозы населения природных источников ионизирующих излучений [2, 3]. Техногенные изменения городской среды обитания, применение различных природных материалов в строительстве и благоустройстве территорий городов могут влиять на мощность эквивалентной дозы гамма-излучения на открытой местности. Как показали инициативные исследования в различных регионах, уровень облучения населения за счет природных источников ионизирующего

Кузмичев Максим Константинович

Центр гигиены и эпидемиологии в Воронежской области, Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко

Адрес для переписки: 394038, г. Воронеж, ул. Космонавтов, д. 21; E-mail: maxidoctor@rambler.ru

излучения на открытой местности в силу различных факторов и причин может варьировать в несколько раз [4, 5].

В этой связи исследования по оценке мощности эквивалентной дозы гамма-излучения на открытой местности территории городов, в которых проживает значительная доля населения России, являются актуальными.

Цель исследования – выявление закономерностей распределения величины мощности эквивалентной дозы гамма-излучения на открытой местности городского пространства в зависимости от функционального назначения внутригородской территории и типа её искусственного покрытия.

Материалы и методы

В рамках реализации проекта РФФИ №17-05-00569 «Исследование закономерностей формирования эколого-геохимического фона и зон риска для здоровья населения селитебно-промышленных территорий Центрального Черноземья», в котором совместно с учеными кафедры геоэкологии и мониторинга окружающей среды Воронежского государственного университета участвуют специалисты радиологической лаборатории ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Воронежской области» (аттестат аккредитации испытательного лабораторного центра № RA.RU.510125 от 13.12.2016 г., бессрочный) было выполнено обоснование 70 точек отбора проб атмосферного воздуха и почвы на внутригородской территории города Воронежа (отдельное направление исследований геохимического фона) [6].

В этих же точках в 2019 г. (летний период, с 24 по 28 июня) проведены 143 измерения эквивалентной дозы гамма-излучения на открытой местности (не менее 2 измерений в каждой точке). Выбор мест исследования изначально был определен по 5 видам функциональных внутригородских зон, в том числе: 1) жилая зона с 3 под-зонами: (жилая ЦИ) – центральная историческая часть города, включая общественно-деловую застройку и «старую» 5-этажную застройку преимущественно 1950–1970-х гг.; (жилая СП) – кварталы с современной многоэтажной застройкой преимущественно от 9 этажей и выше; (жилая ЧС) – «частный сектор», преимущественно одноэтажная и коттеджная жилая застройка – 15 точек, в том числе ЦИ – 7 точек, СП – 6 точек, ЧС – 7 точек; 2) промышленная зона – 18 точек; 3) зона рекреации – 14 точек; 4) транспортная зона – 17 точек; 5) фон (акватория внутригородского Воронежского водохранилища) – 1 точка. Фоновой точкой служило место измерения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения в акватории внутригородского Воронежского водохранилища у дамбы Чернавского моста. Для проведения измерений использовалась надувная лодка. Измерения проводились в дневное время в течение 5 дней. Глубина водохранилища в месте измерения составляла 2,5–3,2 м. Выбор фоновой точки измерения основан на теоретических сведениях о том, что толща воды ослабляет ионизирующее излучение, обусловленное присутствием природных радионуклидов на твердой земной поверхности.

В остальных точках внутригородской территории проведены однократные измерения. Для исключения влияния на результаты измерений строений они проводились на расстоянии не менее 50 м от стен зданий.

Для проведения радиационного контроля территории города Воронежа использовался высокочувствительный компактный поисковый прибор – измеритель-сигнализатор поисковый микропроцессорный ИСП-РМ1401МА, предназначенный для обнаружения и локализации радиоактивных материалов (Свидетельство о поверке №13/8282 от 9.10.2018 г.). В приборе предусмотрены два режима работы: поиск радиоактивных источников по их внешнему гамма-излучению и оценка уровня излучения в мкЗв/ч (по линии Cs^{137} в коллимированном излучении).

Для оценки достоверности различий средних величин показателя по функциональным внутригородским зонам рассчитывалось среднее значение и ошибка среднего ($M \pm m$), где $m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$, n – число измерений). Параметрические методы статистики по сравнению с непараметрическими методами позволяют статистически однозначно интерпретировать полученные результаты. В этой связи нет необходимости использовать другие статистические инструменты.

Результаты и обсуждение

В целом, радиационная обстановка на территории городского округа город Воронеж на протяжении многолетнего периода существенно не изменялась и оставалась удовлетворительной. По итогам радиационно-гигиенической паспортизации 2018 г. основными дозообразующими факторами для населения остаются природные и медицинские источники ионизирующих излучений, а коллективная годовая эффективная доза облучения населения за счет всех источников ионизирующего излучения составила 8630,82 чел.-Зв (по РФ – 558857 чел.-Зв). В структуре коллективной дозы населения доза от природных источников ионизирующих излучений составляет 84,32% (в среднем по РФ – 85,58%), от медицинских – 15,4% (по РФ – 14,13%), от техногенно измененного радиационного фона, включая глобальные выпадения и аварию на ЧАЭС, – 0,16% (по РФ – 0,24%); от деятельности предприятий, использующих источники ионизирующих излучений, – 0,12% (по РФ – 0,05%).

Вместе с тем, систематический мониторинг радиационной обстановки, проводимый специалистами радиологической лаборатории Центра гигиены и эпидемиологии в Воронежской области, осуществляется в одной контрольной точке по адресу расположения учреждения – Воронеж, ул. Космонавтов, 21. В период проведения исследования показатель мощности эквивалентной дозы гамма-излучения не имел существенных колебаний и составлял 0,11–0,12 мкЗв/ч.

В соответствии с п. 5.1.6 СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010)» уровень радиоактивного загрязнения, основанный на измерении мощности эквивалентной дозы гамма-излучения на открытой местности селитебной территории, должен быть не более 0,3 мкЗв/ч.

В рамках нашего исследования в дополнение к имеющимся систематическим данным о радиационной обстановке выполнены измерения в 70 контрольных точках. При оценке результатов измерений (табл. 1, 2), проведенных на твердой земной поверхности, так называемый «нулевой» фон вычитался из полученных значений мощности эквивалентной дозы гамма-излучения.

Установлено, что показатель мощности эквивалентной дозы гамма-излучения составлял от 0,06 (фоновая точка) до 0,14 мкЗв/ч (с учетом фона) (селитебная территория центральной исторической части города). На этой же территории наибольшее значение среднего показателя составляет $0,073 \pm 0,012$ мкЗв/ч; далее следует транспортная функциональная зона (измерения на краю проезжей части, прилегающих к проезжей части тротуарах) – $0,058 \pm 0,004$ мкЗв/ч.

По отношению к фоновой точке (0,06–0,08 мкЗв/ч) на твердой земной поверхности во всех функциональных зонах выявлены достоверные отличия средних величин показателя мощности эквивалентной дозы гамма-излучения ($t_{\text{расч.}} = 6,40 \div 8,53 > t_{\text{табл.}} = 2,78$, при вероятности статистической ошибки менее 5% и минимальном количестве измерений в одной зоне $n=5$) (табл. 1).

Вместе с тем, оценка достоверности различий средних величин показателей по отношению к рекреационным внутригородским зонам (парки, скверы, пляж на водохранилище, измерения проводились в местах отсутствия искусственного покрытия) не подтвердила гипотезу различий величин мощности эквивалентной дозы гамма-из-

лучения техногенно нагруженных (промышленной, транспортной) и жилой зон ($t_{\text{расч.}} < t_{\text{табл.}}$). Такие различия по уровню загрязнения атмосферного воздуха и почвы на внутригородских территориях были выявлены ранее [7]. Это, по нашему мнению, свидетельствует о том, что в условиях города Воронежа отсутствует связь мощности эквивалентной дозы гамма-излучения с уровнем химического загрязнения окружающей среды.

Нами проведена группировка выполненных измерений в зависимости от вида твердой поверхности (гранитная брусчатка, асфальтовое покрытие, тротуарная плитка, открытый грунт). Более детально дифференцировать покрытие на текущем этапе исследования не представлялось возможным из-за большого числа рецептуры применяемых асфальтобетонных смесей, а также их различной зернистости (мелкозернистой, среднезернистой, крупнозернистой) и различных рецептур и видов тротуарной плитки. Это позволило установить закономерность величин показателя мощности эквивалентной дозы гамма-излучения на открытой местности внутригородского пространства от типа покрытия (табл. 2).

Таблица 1
Мощность эквивалентной дозы гамма-излучения в зависимости от функциональной городской зоны, мкЗв/ч
[Table 1]

Показатель [Indicator]	Функциональные зоны [Functional zone]						Фон, водная поверхность (1 точка) [Background, water surface (1 point)]
	Промыш- ленная (18 точек) [Industrial (18 points)]	Транспорт- ная (17 точек) [Transport (17 points)]	Жилая СЗ (6 точек) [Residual SZ (6 points)]	Жилая ЦИ (7 точек) [Residual CI (7 points)]	Жилая ЧС (7 точек) [Residual CHS (7 points)]	Рекреацион- ная (14 точек) [Recreational (14 points)]	
Число измерений [Number of measurements]	36	34	12	14	14	28	5
Минимальный показатель [Minimum]	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,06
Максимальный показатель [Maximum]	0,07	0,09	0,08	0,14	0,07	0,07	0,08
Средний показатель ($M \pm m$) [Mean]	$0,049 \pm 0,002$	$0,058 \pm 0,004$	$0,053 \pm 0,004$	$0,073 \pm 0,012$	$0,053 \pm 0,004$	$0,048 \pm 0,002$	$0,072 \pm 0,004$
Расчетный крите- рий Стьюдента (по отношению к фону), $t_{\text{расч.}}$ [Student's t criteria (compared to background)]	8,11	8,53	6,40	3,88	6,98	8,11	–
Расчетный крите- рий Стьюдента (по отношению к зонам рекреации), $t_{\text{расч.}}$ [Student's criteria (compared to recre- ational zones)]	0,44	2,13	0,95	1,62	0,98	–	-8,11

Таблица 2
Мощность эквивалентной дозы гамма-излучения в зависимости от типа покрытия на открытой местности, мкЗв/ч

[Table 2]

Equivalent dose rate of gamma radiation for different types of surfaces in the open areas, $\mu\text{Sv/h}$

Показатель [Indicator]	Искусственные покрытия Artificial surfaces			Открытый грунт [Open ground]
	Гранитная брусчатка [Granite blocks]	Асфальтовое покрытие [Asphalt]	Тротуарная плитка [Paving slabs]	
Число измерений [Number of measurements]	5	24	26	14
Минимальный показатель [Minimum]	0,09	0,06	0,04	0,03
Максимальный показатель [Maximum]	0,14	0,08	0,07	0,07
Средний показатель ($M \pm m$) [Mean ($M \pm m$)]	$0,104 \pm 0,013$	$0,072 \pm 0,005$	$0,057 \pm 0,005$	$0,048 \pm 0,006$
Расчетный критерий Стьюдента (по отношению к открытому грунту), $t_{\text{расч.}}$ [Calculated Student criteria (relative to open ground)]	3,50	2,84	1,09	-

Максимальные уровни гамма-фона ($0,09-0,14$ мкЗв/ч) на территории города Воронежа отмечались в тех местах, где для благоустройства территории использовались обработанные природные камни (гранит) – площадь Ленина, участок территории перед Воронежским механическим заводом, Адмиралтейская площадь. Среднее значение показателя составляет $0,104 \pm 0,013$ мкЗв/ч, что достоверно отличается от открытого грунта внутригородской территории ($t_{\text{расч.}} = 3,50$, при $p < 0,05$).

Заключение

Результаты оценки радиационного фона показывают, что мощность эквивалентной дозы гамма-излучения (гамма-фона) на территории города Воронежа не превышает допустимых значений. Достоверных различий средних значений показателей в промышленной, транспортной, жилой функциональных зонах по отношению к рекреационной не выявлено ($t_{\text{расч.}} < t_{\text{табл.}}$, $p < 0,05$). Максимальные уровни гамма-фона ($0,09-0,14$ мкЗв/ч) на территории города Воронежа отмечались в тех местах, где для благоустройства территории использовались обработанные природные камни (гранит). При решении задачи выявления зависимости показателя мощности эквивалентной дозы гамма-излучения на открытой местности внутригородского пространства от типа покрытия для снижения неопределенностей в перспективе необходимо учитывать рецептуру материалов, особенно долю гранитной крошки.

Конфликты интересов авторов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование исследования. Исследование проведено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект РФФИ №17-05-00569 «Исследование закономерностей формирования эколого-геохимического фона и зон риска для здоровья населения селитебно-промышленных территорий Центрального Черноземья».

Благодарности. Авторы благодарят главного врача Центра гигиены и эпидемиологии в Воронежской области, доктора медицинских наук, профессора Стёпкина Юрия Ивановича за возможность использования инструментальной базы радиологической лаборатории для проведения исследования.

Литература

- Онищенко, Г.Г. Деятельность Роспотребнадзора по обеспечению радиационной безопасности населения России / Г.Г. Онищенко, И.К. Романович // Здравоохранение Российской Федерации. – 2013. – №2. – С. 35-40.
- 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.
- Романович, И.К. Природные источники ионизирующего излучения: дозы облучения, радиационные риски, профилактические мероприятия / И.К. Романович, И.П. Стамат, Т.А. Кормановская, Д.В. Кононенко [и др.]; Под редакцией академика РАН Г.Г. Онищенко и профессора А.Ю. Поповой. – Санкт-Петербург: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2018. – 432 с.
- Историк, О.А. Облучение населения Ленинградской области за счет природных источников ионизирующего излучения / О.А. Историк, Л.А. Еремина, А.Н. Барковский, Т.А. Кормановская, Р.Р. Ахматдинов // Радиационная гигиена. – 2018. – Т.11. – № 2. – С. 91-97.
- Степанов, Е.Г. Обеспечение радиационной безопасности населения при воздействии природных источников ионизирующего излучения / Е.Г. Степанов, А.С. Жеребцов, Ш.З. Гильманов, И.И. Хисамиев, Е.С. Шакирова, О.В. Туваняева // Радиационная гигиена. – 2015. – Т.8. – №1. – С. 73-75.
- Куrolап, С.А. Медико-экологический атлас города Воронежа / С.А. Куrolап, Т.И. Прожорина, М.А. Клевцова, П.М. Виноградов, Н.В. Каверина и др. — Воронеж:

Воронежский государственный университет, 2019. — URL: <http://www.geogr.vsu.ru/atlas.htm> (дата обращения 21.06.2019 г.).

А.С. Самойлов, И.Б. Ушаков, В.И. Попов, С.А. Куrolап // Гигиена и санитария. – 2018. – Т. 97. – № 8. – С. 686-692.

7. Клепиков, О.В. Комплексная оценка состояния окружающей среды промышленного города / О.В. Клепиков,

Поступила: 10.07.2019 г.

Чубирко Михаил Иванович – заместитель главного врача Федерального бюджетного учреждения здравоохранения «Центр гигиены и эпидемиологии в Воронежской области», профессор кафедры общественного здоровья, здравоохранения, гигиены и эпидемиологии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Воронеж, Россия

Клепиков Олег Владимирович – доктор биологических наук, профессор, заведующий отделением информационных технологий организационно-методического отдела Федерального бюджетного учреждения здравоохранения «Центр гигиены и эпидемиологии в Воронежской области», профессор кафедры промышленной экологии, оборудования химических и нефтехимических производств Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный инженерный университет», Воронеж, Россия

Куrolап Семен Александрович – доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой геоэкологии и мониторинга окружающей среды Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный университет», Воронеж, Россия

Кузмичев Максим Константинович – кандидат медицинских наук, заведующий радиологической лабораторией Испытательного лабораторного центра Федерального бюджетного учреждения здравоохранения «Центр гигиены и эпидемиологии в Воронежской области», доцент кафедры гигиенических дисциплин Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко». Адрес для переписки: 394038, г. Воронеж, ул. Космонавтов, д. 21; E-mail: maxidoctor@rambler.ru

Студеникина Екатерина Михайловна – врач отделения статистики организационно-методического отдела, Федерального бюджетного учреждения здравоохранения «Центр гигиены и эпидемиологии в Воронежской области», ассистент кафедры гигиенических дисциплин Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко», Воронеж, Россия

Для цитирования: Чубирко М.И., Клепиков О.В., Куrolап С.А., Кузмичев М.К., Студеникина Е.М. Оценка мощности эквивалентной дозы гамма-излучения на открытой местности территории города Воронежа // Радиационная гигиена. – 2019. – Т. 12, № 4. – С. 66–71. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-66-71

Estimation of the equivalent dose rate of gamma radiation in the open territory of the city of Voronezh

Mikhail I. Chubirko^{1,2}, Oleg V. Klepikov^{1,3}, Semen A. Kurolap⁴, Maksim K. Kuzmichev^{1,2}, Ekaterina M. Studenikina^{1,2}

¹Center for Hygiene and Epidemiology in the Voronezh region, Voronezh, Russia

²Voronezh State Medical University named N.N. Burdenko the Ministry of Health, Voronezh, Russia

³Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia,

⁴Voronezh State University, Voronezh, Russia

The aim of the study was to identify patterns of distribution of the magnitude of the the equivalent dose rate of gamma radiation in an open area of urban space, depending on the functional purpose of the inner-city territory and the type of artificial coating. Materials and methods. Measurements of the equivalent dose rate of gamma radiation (gamma background) in the city of Voronezh were carried out at 70 points, conventionally classified by functional

Maksim K. Kuzmichev

Center for Hygiene and Epidemiology in the Voronezh region, Voronezh State Medical University named N.N. Burdenko

Address for correspondence: Kosmonavtov Str., 21, Voronezh, 394038, Russia; E-mail: maxidoctor@rambler.ru

use (industrial area, transport area, residential area, recreational area), as well as the type of coverage in open areas (granite stone blocks, asphalt pavement, paving slabs, open ground) For carrying out radiation monitoring, a highly sensitive portable search device was used – a search measuring gauge microprocessor ICP-PM1401MA. To assess the reliability of differences in the average values of the indicator by functional inner-city zones and types of artificial turf, the methods of parametric statistics (Student's criterion) are used. Parametric methods of statistics in comparison with nonparametric methods allow statistically unambiguous interpretation of the results. There is no need to use other statistical tools in this regard. Results. The results of the evaluation of the radiation background show that the equivalent dose rate of gamma radiation (gamma background) in the city of Voronezh is from 0.06 to 0.14 $\mu\text{Sv/h}$ and it does not exceed the permissible value (0.3 $\mu\text{Sv/h}$). Significant differences in the average values of indicators in the industrial, transport, residential functional areas in relation to the recreational area were not found ($t_{\text{calc}} < t_{\text{tabl}}$, $P < 0.05$). The maximum levels of gamma background (0.09–0.14 $\mu\text{Sv/h}$) in the territory of the city of Voronezh were found in those places where processed natural stones (granite) were used for the improvement of the territory. When solving the problem of identifying the dependence of the indicator of the equivalent dose rate of gamma radiation in an open area of an inner-city space on the type of coating, in order to reduce uncertainties in the future, it is necessary to take into account the formulation of materials, especially the fraction of granite chips.

Key words: equivalent dose rate of gamma radiation, open area, urban area.

References

1. Onischenko G.G., Romanovich I.K. Rospotrebnadzor activities on the provision of the radiation safety of the public of Russia. Healthcare of the Russian Federation, 2013, № 2, pp. 35–40. (in Russian).
2. Onischenko G.G., Popova A.Y., 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;10(3):18–35. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-3-18-35>
3. Romanovich I.K., Stamat I.P., Kormanovskaya T.A., Kononenko D.V. [et al.] Natural sources of ionizing exposure: doses, radiation risks, prophylactic actions. Ed. By academic of RAS G.G. Onischenko and prof. A.Yu. Popova. – St-Petersburg: FBUN NIIRG after P.V. Ramzaev, 2018. – 432 p. (in Russian).
4. Istorik O.A., Eremina L.A., Barkovsky A.N., Kormanovskaya T.A., Akhmatdinov R.R. Exposure of the public of the leninrgad region due to the natural sources of ionizing radiation. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2018;11(2):91–97. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-2-91-97>.
5. Stepanov E.G., Zherebtsov A.S., Gilmanov S.Z., Khisamiev I.I., Shakirova E.S., Tuvanyayeva O.V. Population radiation protection providing under the influence of natural ionizing irradiation sources. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2015;8(1):73–75. (In Russian)
6. Kurolap S.A., Prozhorina T.I., Klevcova M.A., Vinogradov P.M., Kaverina N.V. et al. Mediko-ekologicheskii atlas goroda Voronezha = Medical-ecological atlas of Voronezh. Voronezh, Voronezh State University, 2019. — Available on: <http://www.geogr.vsu.ru/atlas.htm> (Accessed: 21.06.2019). (In Russian).
7. Klepikov O.V., Samoylov A.S., Ushakov I.B., Popov V.I., Kurolap S.A. Complex assessment of the environment in the industrial city. Gygiena i sanitariya = Hygiene and Sanitary, 2018, Vol. 97, № 8, pp. 686–692. (In Russian).

Received: July 10, 2019

Mikhail I. Chubirko – Deputy of the chief doctor of the Federal budgetary healthcare facility Center for Hygiene and Epidemiology in the Voronezh region, Professor of the cathedra of public health, healthcare, hygiene and epidemiology of the Federal state budgetary educational facility of high education Voronezh State Medical University named N.N. Burdenko of the Ministry of Health, Voronezh, Russia

Oleg V. Klepikov – Doctor of biological sciences, professor, head of the division of information technologies of the organizational and methodological department Center for Hygiene and Epidemiology in the Voronezh region, Professor of the cathedra of industrial ecology, equipment of chemical and oil industries of the Federal state budgetary educational facility of high education Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia

Semen A. Kurolap – Doctor of geographical sciences, professor, head of the cathedra of geoecology and environmental monitoring of the Federal state budgetary educational facility of high education Voronezh State University, Voronezh, Russia

For correspondence: Maksim K. Kuzmichev – MD, head of the radiochemical laboratory of the Test laboratory center of the federal budgetary healthcare facility Center for Hygiene and Epidemiology in the Voronezh region, Docent of the cathedra of hygienic disciplines of the Federal state budgetary educational facility of high education Voronezh State Medical University named N.N. Burdenko of the Ministry of Health (Kosmonavtov Str., 21, Voronezh, 394038, Russia; E-mail: maxidoctor@rambler.ru)

Ekaterina M. Studenikina – Physician of the statistical division of the organizational and methodological department Center for Hygiene and Epidemiology in the Voronezh region, Assistant of cathedra of hygienic disciplines of the Federal state budgetary educational facility of high education Voronezh State Medical University named N.N. Burdenko of the Ministry of Health, Voronezh, Russia

For citation: Chubirko M.I., Klepikov O.V., Kurolap S.A., Kuzmichev M.K., E.M. Studenikina Estimation of the equivalent dose rate of gamma radiation in the open territory of the city of Voronezh. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene, 2019, Vol. 12, No. 4, pp. 66–71. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-66-71

Пути оптимизации риск-коммуникации специалистов по радиационной безопасности и населения: рекомендации по языку общения

Г.В. Архангельская, С.А. Зеленцова

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

В статье рассматриваются особенности, присущие языку общения специалистов по радиационной безопасности между собой и с населением. Несмотря на высказываемое населением доверие к специалистам, их общение затруднено не только по организационным причинам, но и в связи с особенностями их языков общения. Лучшие всего население понимает язык не источника сведений по вопросам радиационной безопасности (специалистов), а передатчика этих сведений — журналистов. Следует учитывать разницу задач специалистов и журналистов в донесении сведений до населения насущных проблем радиационной безопасности, в частности, проектов атомной отрасли. Показано, что учет особенностей языка, характерных для населения (или любой его группы), помогает в большой степени оптимизировать информационное обеспечение риск-коммуникации населения по вопросам радиационной безопасности. Это необходимо для развития у населения адекватного отношения к работе атомной отрасли. В статье рассмотрены также этапы риск-коммуникации и факторы, способствующие ее оптимизации.

Ключевые слова: радиационная безопасность, информирование населения, СМИ, журналисты, специалисты, изложение и восприятие научной информации.

Введение

Проведенные многолетние социологические исследования показали, что в целом вопросы по радиационной безопасности в обычной жизни мало интересуют население [1–9]. В то же время при анкетировании и предъявлении списка возможных факторов опасности риск радиационного воздействия оценивается респондентами, наоборот, очень высоко, выше многих других факторов [1, 2, 5–9]. Население в основном так же мало интересуется и плохо знакомо с радиационной обстановкой в местах проживания [3–9]. И все же часть респондентов заинтересована в получении ежедневных сообщений о радиационной обстановке. При этом исследования показали, что в настоящее время население более всего в вопросах радиационной безопасности доверяет специалистам МЧС, Роспотребнадзора, местной администрации [3–11]. Информацию от указанных специалистов население предпочитает получать через привычные для них каналы – телевидение (местное и центральное), Интернет, газеты и другие печатные СМИ [3, 4, 8–11]. Одним из важных путей общения и информирования населения могут быть общественные слушания (в том числе – для авторитетных групп населения – групп влияния и т.п.).

Однако из-за специфики языка специалистов, в особенности работающих в атомной отрасли, население не всегда может адекватно понять преподносимую им информацию [12–16]. В статье рассматриваются различия в языке специалистов и населения с целью оптимизации их взаимопонимания при обсуждении радиационного риска. Специалисты рассматривают риск как «вероятность события», а население воспринимает риск всегда как «опасность». Для сближения точек зрения этих категорий необходимо рассмотреть, почему специалисты не всегда могут объяснить населению понятие «радиационный риск».

Цель исследования – определить пути оптимизации информирования населения специалистами по радиационной безопасности.

Задачи исследования

Определение специфики языков, используемых специалистами по радиационной безопасности и населением; выработка рекомендаций для специалистов по языку общения с населением.

Архангельская Генриэтта Владимировна

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

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

Результаты и обсуждение

Специалисты не всегда находят общий язык с населением, поскольку привыкли говорить на своем профессиональном языке, который в значительной степени отличается от привычного для населения языка, используемого журналистами [17, 18]. Для такого различия в языке существуют причины, имеющие в своей основе не только профессиональную деятельность специалистов, но и психологические характеристики, свойственные многим ученым, которые могут мешать общению специалистов и населения.

В исследовании психологических профилей у различных групп населения и у группы ученых – специалистов по радиационной защите Канады и США (800 человек), выполненном американскими учеными с помощью анкеты (Myers-Briggs Type Indicator), широко используемой при приеме на работу, связанную с выполнением интеллектуальных задач, выяснилось, что предпочтения в путях выбора решений и языка общения с аудиторией у подавляющего большинства специалистов по вопросам радиационной безопасности и у различных групп населения довольно резко различаются [13, 14, 19]. Это приводит к определенным трудностям как при непосредственном общении, так и при других принятых путях информирования общества о различных аспектах использования источников ионизирующего излучения и возможностей его воздействия на человека.

При рассмотрении разницы в языках, используемых населением и специалистами, следует учесть, что существует четыре разновидности предпочтений в выборе языка общения [20–23]. Каждая разновидность выбора тесно связана с психологией конкретного человека и зависит от целого ряда факторов. К ним относятся следующие:

1. Психотип индивида:

- ЭКСТРАВЕРТЫ (E – extraversion), предпочитающие взаимодействия с людьми, на основе опыта деятельности, наблюдения за окружающей средой;
- ИНТРАВЕРТЫ (I – introversion), предпочитающие взаимодействия с людьми на основе собственных мыслей и идей.

2. Способ получения информации:

- с помощью ОЩУЩЕНИЙ (S – sensing), то есть используя свои пять органов чувств;
- с помощью ИНТУИЦИИ (N – intuition), то есть рассматривая образцы поведения, связи, значения событий, воображаемые возможности.

3. Способ принятия решения:

- с помощью РАЗМЫШЛЕНИЙ (T – thinking), то есть используя логический анализ, принципы определения истины;
- с помощью ЧУВСТВОВАНИЯ (F – feeling), то есть используя персональные оценки, другие аспекты и чувства для определения того, что «хорошо».

4. Отношение к другим индивидам:

- на основе СУЖДЕНИЙ (J – judging), то есть оценивая с помощью планирования, организации, принятия решений и прилагая усилия для завершения прений.
- на основе ПОНИМАНИЯ (ПРИНЯТИЯ) (P – perceiving), то есть увеличивая свою осведомленность, делая открытый выбор, прилагая усилия для достижения понимания.

Ряд исследователей считают, что каждый человек отдает предпочтение одной из сторон каждого из перечисленных выше факторов так же естественно, как то, что люди от природы являются правшами или левшами [20, 25–28].

При исследовании анкет специалистов США и Канады по радиационной защите выяснилось, что в основном типичным профилем для них является сочетание INTJ (интроверсия, интуиция, размышление, суждение), в то время как среди населения лишь 1% имеет такой профиль, то есть предпочтение в выборе поведения и языка.

Для носителя такого профиля, то есть для специалистов, характерны как положительные, так и отрицательные качества [20–25, 28]. Из положительных качеств можно отметить способность к самостоятельному и независимому решению, компетентность, эффективность деятельности, склонность к логическому и аналитическому мышлению. К слабым сторонам профиля специалистов относятся большая независимость, неэмоциональность, замкнутость, высокая требовательность и критичность. Носители такого профиля могут пренебрегать социальными ритуалами и не любят тратить время на тщетный диалог. Таким образом, главной проблемой специалистов, обладающих преимущественно данным типом профиля, является *коммуникация с другими психологическими типами*, к которым относится большинство населения.

Языковые трудности возникают даже при общении специалистов на одном и том же языке.

Языки базируются на одной из двух возможных характеристик того, как мы предпочитаем собирать информацию (т.е. на основе ОЩУЩЕНИЙ или ИНТУИЦИИ), а также на одном из двух способов принятия решений (т.е. на основе РАЗМЫШЛЕНИЙ или ЧУВСТВОВАНИЯ). Большинство специалистов предпочитают общаться на языке РАЗМЫШЛЕНИЙ (от 60 до 80% специалистов). Именно на этом языке, как правило, ученые составляют логические, рациональные, аналитические заключения. Такой тип общения является предпочтительным для технических специалистов – ученых, физиков, инженеров и даже многих управленцев (руководителей). Тем самым они теряют 75–90% аудитории, так как среди населения такой язык предпочитают всего 10–25% лиц.

Осознавая эти расхождения в предпочтениях, ряд специалистов по радиационной защите пытаются использовать язык, предпочитаемый ими во вторую очередь, – язык ИНТУИЦИИ (N). На нем общаются 25–30% специалистов. Такой язык общения полагается на вдохновение, воображение, откровенность (искренность), использование теорий, моделей.

К сожалению, этот язык будет услышан менее чем 10% аудитории – в основном, представленной писателями, художниками, теоретиками и некоторыми предпринимателями.

Для 40% населения и более предпочтительным является язык, основанный на ОЩУЩЕНИИ (S). Он базируется на опыте наших пяти чувств и сфокусирован на том, что сказано и сделано в настоящий момент. Такой тип языка требует ответа на темы радиации типа: «Это опасно или нет, именно сейчас». Для специалистов по радиационной защите такой язык является третьим по степени предпочтения, на нем склонны говорить менее 10% из них.

Наиболее трудным языком общения для специалистов является язык, основанный на ЧУВСТВОВАНИИ (F) – он является четвертым по степени предпочтения для специалистов и его стараются избегать всеми способами. Менее 10% специалистов готовы его использовать, хотя 25% и более лиц из всего населения предпочитают именно его. Этот язык противоположен языку РАЗМЫШЛЕНИЙ (Т), так же, как и решения, которые основываются на субъективных оценках, чувствах и личном опыте.

Исходя из существования четырех различных языков, можно сделать вывод, что неудачи общения бывают, когда специалисты не могут или не хотят переводить собственные знания и суждения на язык других лиц. Тогда два человека (группы лиц) говорят на разных языках и не в состоянии создать общую систему ценностей или вывести общее заключение, понять существо дела.

Большинство программ информации ориентированы на обеспечение общества упрощенной информацией, чтобы дать населению основы для понимания ядерной технологии.

Для специалистов (в том числе для представителей Росатома) важно, чтобы общество понимало, что такое радиация, как мы развиваем ядерные технологии, а также логически принимало то, что делается и как это делается.

Именно по указанным выше причинам информацию о радиационной безопасности по сути дела население получает из СМИ от журналистов [3, 4, 6, 8–11], а также из Интернета от различных его пользователей, в том числе от блогеров [3, 8, 13, 17], так как они владеют языком, доступным для большинства населения. Журналисты используют простые и ясные слова и выражения, ставят вопросы типа «да или нет», «было или не было»; предпочитают оценку, основанную на впечатлении, ощущении, чувстве, стремятся придать ярко выраженную эмоциональную окраску любому сообщению [10]. Специалисты, напротив, используют профессиональные термины и технический жаргон, рассматривают вероятность того, что событие произошло или могло произойти, в оценках события оперируют научными данными, фактами, доказательствами, предпочитают эмоционально-нейтральное изложение событий, мнений [27]. Если к этому прибавить различие задач, стоящих перед журналистами и специалистами, а именно: задачи журналистов – развлекать и информировать, освещать любое событие как сенсацию, оценивать одно конкретное событие, избегая сравнений и анализа, привлекать, удерживать внимание, дорожке «продать» любую информацию; задачи специалистов – обучать и информировать, рассказывать о привычных фактах повседневной жизни, формулировать конкретные проблемы, сравнивать риски различных событий, стремиться к сравнению усредненных показателей и последствий события, обеспечить стабильность жизни, облегчить ситуацию, то можно видеть, каковы сложности получения населением правдивой информации по вопросам радиационной безопасности.

Заключение

Ключом к успешному информированию населения для специалистов является:

- осознание того, что есть несколько языков для использования в общении;
- необходимость выбрать тот язык, который предпочитает аудитория.

Специалисты должны переводить то, что они хотят сказать, на язык аудитории в большей степени, чем заставлять ее принять чуждый для нее язык. Если специалисты это осознают и попытаются так поступить, аудитория становится более спокойной и доступной, более готовой принять информацию, даже если специалисты владеют этим языком недостаточно хорошо. Эффективность передачи информации от специалистов аудитории в этих случаях будет значительно выше.

Специалисты должны также учитывать, что население легче воспринимает эмоционально окрашенную информацию.

В связи с тем, что журналисты гораздо легче общаются с обычной аудиторией и тем более – гораздо легче, чем специалисты, умеют убеждать, необходимо наладить тесные постоянные взаимно полезные связи специалистов с местными работниками СМИ и использовать их умение доносить информацию до населения. Точность, оперативность, правдивость и полезность информации о радиации – задача специалистов. Задача же журналистов – донести полученные сведения от специалистов населению языком, понятным ему, но без утери и искажения информации.

Следует помнить о том, что риск-коммуникация всегда является частью стратегии, предназначенной для выработки поведения, полезного для здоровья населения.

Поскольку риск есть количественная мера опасности в отношении вероятности того, что связанные с ней ущерб или нежелательные последствия станут реальностью, населению это трудно понять. Информация о риске поэтому должна иметь целый ряд этапов:

1. *Оценка самого риска* специалистами и выработка решения о том, какую информацию следует передавать.

Следует помнить, что восприятие риска специалистом и населением различно, поскольку население всегда понимает термин «риск» как «опасность», «ущерб». Для населения имеют значение такие характеристики риска, как добровольность, возможность влиять на него, масштабность, возможность ощутить опасность с помощью пяти чувств и др.

2. *Постановка цели* – при передаче информации необходимо помнить, какова цель информирования (от простого информирования до рекомендаций по поведению).

3. *Выбор аудитории* – все население, население отдельных районов, персонал предприятия и пр. При создании информации следует учитывать, для кого она предназначена.

4. *Источник информации* – необходимо, чтобы он обладал высоким уровнем доверия у населения.

К заключительному этапу риск-коммуникации по вопросам радиационной безопасности следовало бы отнести оценку эффективности такого информирования, т.е. иметь обратную связь с той аудиторией, для которой информация была предназначена.

Литература

1. Архангельская, Г.В. Социально-психологические аспекты защиты населения / Г.В. Архангельская, И.А. Зыкова, Н.М. Вишнякова; под ред. акад. РАН Г.Г. Онищенко и проф. А.Ю. Поповой // Радиационно-гигиенические аспекты преодоления последствий аварии на Чернобыльской АЭС. Том 1. – СПб.: НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева, 2016. – Т.1. – С. 352-388.

2. Романович, И.К. Авария на АЭС «Фукусима-1»: организация профилактических мероприятий, направленных на сохранение здоровья населения Российской Федерации / И.К. Романович [и др.]; под ред. акад. РАМН Г.Г. Онищенко. – СПб.: НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева, 2012. – 336 с.
3. Библин, А.М. Проблемы риск – коммуникации по вопросам радиационной безопасности: предпочтения населения Ленинградской и Мурманской областей в источниках получения информации / А.М. Библин [и др.] // Радиационная гигиена. – 2018. – Т.11, № 2. – С. 60-73.
4. Архангельская, Г.В. Проблемы информирования населения о последствиях мирных ядерных взрывов / Г.В. Архангельская [и др.] // Радиационная гигиена. – 2011. – Т.4, №1. – С. 20-26.
5. Архангельская, Г.В. Субъективные оценки радиационного риска на территориях, прилегающих к местам проведения мирных ядерных взрывов / Г.В. Архангельская [и др.] // Радиационная гигиена. – 2009. – Т.2, №2. – С. 34-39.
6. Зеленцова, С.А. Общественное мнение о мирных ядерных взрывах в Пермском крае / С.А. Зеленцова, Г.В. Архангельская, И.А. Зыкова // Радиационная гигиена. – 2010. – Т.3, №1. – С. 5-9.
7. Архангельская, Г.В. Мнение местных жителей о последствиях мирных ядерных взрывов, проведенных на территории республики Саха (Якутия) / Г.В. Архангельская [и др.] // Радиационная гигиена. – 2010. – Т.3, №4. – С. 15-21.
8. 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 [и др.] // Радиационная гигиена. – 2017. – Т.10, № 3. – С. 45-56.
9. Библин, А.М. Общественное мнение по вопросам радиационной безопасности в Архангельской области / А.М. Библин [и др.] // Актуальные вопросы радиационной гигиены: Матер. междунар. науч.-практ. конф. – 2018. – С. 55-57.
10. Архангельская, Г.В. Трудности информирования населения по вопросам радиационной безопасности / Г.В. Архангельская, И.А. Зыкова, С.А. Зеленцова // Радиационная гигиена. – 2014. – Т. 7, № 2. – С. 42-49.
11. Зеленцова, С.А. Пути оптимизации коммуникационной деятельности по вопросам радиационной безопасности с учетом информационных потребностей населения / С.А. Зеленцова, Г.В. Архангельская, Е.В. Храмцов // Современные проблемы радиационной медицины: от науки к практике (г. Гомель, 26-27 апреля 2018 г.) Матер. междунар. науч.-практ. конф. / Под общ. ред. доктора мед. наук, доц. А.В. Рожко. – Гомель, ГУ «Республиканский научно-практический центр радиационной медицины и экологии человека», 2018. – С. 57-58.
12. Ваганов, П.А. Экологические риски / П.А. Ваганов, М.С. Им // Учебное пособие. Издание 2-е, переработанное и дополненное. Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2001, – 151 с.
13. Perko T. Radiation risk perception: a discrepancy between the experts and the general population. Journal of environmental radioactivity, 2014, V. 133, pp. 86-91.
14. Perko T., Adam B., Stassen K.R. The differences in perception of radiological risks: lay people versus new and experienced employees in the nuclear sector. Journal of Risk Research, 2015, Vol. 18, №. 1, pp. 40-54.
15. Kasperson, R.E. The Social Amplification of Risk: A Conceptual Framework. Risk Analysis, 1988, V. 8, № 2, pp. 177–187.
16. Hyer R.N., Covello V.T. Breaking bad news in the high-concern, low trust setting: how to get your story heard. Health physics, 2017, V. 112, №. 2, pp. 111-115.
17. Tomkiv Y, Perko T, Oughton DH, Prezeli I, Cantone MC, Gallego E. 2How did media present the radiation risks after the Fukushima accident: a content analysis of newspapers in Europe. Journal of Radiological Protection, 2016, V. 36, №. 2, pp. 64-81.
18. Pidgeon N., Kasperson R.E., Slovic P. (ed.). The social amplification of risk. Cambridge University Press, 2003, 448 p.
19. Scott, T.H. & Scott, J.C. Utilization of the Myers-Briggs Type Indicator by a freshman engineering advising center. In Lifelong Learning in Engineering Proceedings, American Society for Engineering Education 1996 Southeastern Section Meeting: April 14-16, 1996, Knoxville, Tennessee. Washington, D.C.: ASEE.
20. Крегер, О. Типы людей: 16 типов личности / О. Крегер, Дж. Тьюсон. – М.: Персей – Вече – АСТ. – 2005. – 2-е изд. – 352 с.
21. Майерс, И. MBTI. Определение типов. У каждого свой дар / И. Майерс, П. Майерс. – М: Издательство: «Бизнес Психологи», 2010. – 320 с.
22. Isabel Briggs Myers with Peter B. Myers. Gifts Differing: understanding personality type. Palo Alto CA: Consulting Psychologist Press, 1995, 248 p.
23. Бриггс – Майерс, И. Психология индивидуальных различий. Типология / И. Бриггс – Майерс, М.Х. Мак-Колли, А.Л. Хаммер Майерс-Бриггс; под ред. Ю.Б. Гиппенрейтер и В.Я. Романова. – М.: ЧеРо, 2000. – С. 754-775.
24. Goldberg, LR. Language and individual differences The search for universals personality lexicons In L Wheeler (Ed), Review of personality and social psychology, 1981, Vol 2, pp. 141-165.
25. Юнг, К.Г. Психологические типы / К.Г. Юнг. – СПб.: изд-во «Азбука», 1996. – 736 с.
26. Робертсон, Р. Введение в психологию Юнга / Р. Робертсон. – Ростов-на-Дону: Феникс, 1998. – 320 с.
27. Ваганов, П.А. Человек, риск, безопасность / П.А. Ваганов. – СПб., изд-во СПбГУ, 2002. – 160 с.
28. Хеджес, П. Анализ характера, или типология по Майерс-Бриггс / П. Хеджес. – М.: Изд-во Эксмо, 2003. – 320 с.

Поступила: 25.04.2019 г.

Архангельская Генриэтта Владимировна – доктор медицинских наук, главный научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: henryark@mail.ru

Зеленцова Светлана Александровна – младший 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: Архангельская Г.В., Зеленцова С.А. Пути оптимизации риск-коммуникации специалистов по радиационной безопасности и населения: рекомендации по языку общения // Радиационная гигиена. – 2019. – Т. 12, № 4. – С. 72–77. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-72-77

Ways to optimize the risk communication between specialists on radiation safety and population: recommendations on communication language

Genrietta V. Arkhagelskaya, Svetlana A. Zelentsova

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 article discusses the features inherent in the language of communication of specialists in radiation safety among themselves and with the public. Despite the confidence expressed by the population to specialists, their communication is difficult not only for organizational reasons, but also for their languages of communication. The population best understands the language not of the source of information on radiation safety issues (specialists), but of the transmitter of this information – journalists. It is necessary to take into account the difference in the tasks of specialists and journalists in conveying information to the population on the urgent problems of radiation safety, in particular, projects of the nuclear industry. It is shown that taking into account the peculiarities of the language characteristic of the population (or any of its groups) helps in a large degree to optimize information support for risk communication of the population on radiation safety issues. This is necessary for the development of an adequate attitude to the work of the nuclear industry. The article also considers the stages of risk-communication and the factors contributing to its optimization.

Key words: radiation safety, public awareness, media, journalists, specialists, presentation and perception of scientific information.

References

1. Arkhagelskaya G.V., Zykova I.A., Vishnyakova N.M. Population protection: social and psychological issues. Radiological and hygienic issues of the mitigation of the Chernobyl NPP accident consequences. Ed.: G.G. Onischenko, A.Yu. Popova. St. Petersburg., Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, 2016, pp. 352-388. (in Russian).
2. Romanovich I.K. [et. al.] Accident at NPP Fukushima-1. Ed. G.G. Onishchenko, St. Petersburg, 2012, 335 p. (in Russian).
3. Biblin A.M. [et al.] Risk-communication issues in radiation safety: preferences of the public in the Leningrad and Murmansk regions on the sources of information. Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene, 2018, Vol. 11, no. 2, pp. 60-73. (In Russian).
4. Arkhagelskaya G.V., Zelentsova S.A., Zykova I.A., Ramzaev V.P., Khramtsov E.V. Problems of informing the public about the consequences of peaceful nuclear explosions. Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene, 2011, Vol. 4, no. 1, pp. 20-26. (In Russian).
5. Arkhagelskaya G.V., Vainberg A.L., Gubernatorova V.V., Daricheva O.A., Zelentsova S.A., Zykova I.A., Repin V.S., Khramtsov E.V. Subjective radiation risk assessments in areas adjacent to the sites of peaceful nuclear explosions. Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene, 2009, Vol. 2, no. 2, pp. 34-39. (In Russian).
6. Zelentsova S.A., Arkhagelskaya G.V., Zykova I.A. Public Opinion on Peaceful Nuclear Explosions in the Perm Territory. Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene, 2010, Vol. 3, no. 1, pp. 5-9. (In Russian).
7. Arkhagelskaya G.V., Vasilyeva T.A., Zelentsova S.A., Medvedev A.Yu., Ramzaev V.P., Timofeeva M.A. Opinion of local residents on the consequences of peaceful nuclear explosions conducted on the territory of the Republic of Sakha (Yakutia). Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene, 2010, Vol. 3, no. 4, pp. 15-21. (In Russian).
8. Sokolov N.V. [et al.] 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, no. 3, pp. 45-56. (In Russian).
9. Biblin A.M., Khramtsov E.V., Repin L.V., Arkhagelskaya G.V., Zelentsova S.A., Sokolov N.V. Public opinion on radiation safety in the Arkhangel'sk region. In the book: Actual issues of radiation hygiene Materials of the international scientific-practical conference, 2018, pp. 55-57. (In Russian).
10. Arkhagelskaya G.V., Zykova I.A., Zelentsova S.A. The difficulties of informing the population on the issues of radiation protection. Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene, 2014, Vol. 7, no. 2, pp. 42-49. (In Russian).

Genrietta V. Arkhagelskaya

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

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

11. Zelentsova S.A., Arkhangel'skaya G.V., Khramtsov E.V. Ways to optimize communication activities on radiation safety issues, taking into account the information needs of the population. Sat Modern problems of radiation medicine: from science to practice (Gomel, April 26-27, 2018) Materials of the international scientific-practical conference. Ed. Dr. med. Sciences, Assoc. A.V. Rozhko. Gomel, State Institution "Republican Scientific and Practical Center of Radiation Medicine and Human Ecology". Gomel: State Institution "RNPC RMEH", 2018, pp. 57-58. (In Russian).
12. Vaganov P.A., Him M.-S. Environmental risks. Tutorial, 2nd edition, revised and enlarged, ed. St. Petersburg University, 2001, 151 p. (In Russian).
13. Perko T. Radiation risk perception: a discrepancy between the experts and the general population. Journal of environmental radioactivity, 2014, V. 133, pp. 86-91.
14. Perko T., Adam B., Stassen K.R. The differences in perception of radiological risks: lay people versus new and experienced employees in the nuclear sector. Journal of Risk Research, 2015, Vol. 18, №. 1, pp. 40-54.
15. Kasperson, R.E. The Social Amplification of Risk: A Conceptual Framework. Risk Analysis, 1988, V. 8, № 2, pp. 177-187.
16. Hyer R.N., Covello V.T. Breaking bad news in the high-concern, low trust setting: how to get your story heard. Health physics, 2017, V. 112, №. 2, pp. 111-115.
17. Tomkiv Y, Perko T, Oughton DH, Prezelj I, Cantone MC, Gallego E. 2How did media present the radiation risks after the Fukushima accident: a content analysis of newspapers in Europe. Journal of Radiological Protection, 2016, V. 36, №. 2, pp. 64-81.
18. Pidgeon N., Kasperson R.E., Slovic P. (ed.). The social amplification of risk. Cambridge University Press, 2003, 448 p.
19. Scott, T.H. & Scott, J.C. Utilization of the Myers-Briggs Type Indicator by a freshman engineering advising center. In Lifelong Learning in Engineering Proceedings, American Society for Engineering Education 1996 Southeastern Section Meeting: April 14-16, 1996, Knoxville, Tennessee. Washington, D.C.: ASEE.
20. Kr ger O., Tewson J. Types of people: 16 personality types. Moscow. Perseus – Veche – AST, 2nd ed, 2005, 352 p. (in Russian).
21. Myers, I., Myers, P. MBTI. Type definition. Everyone has their own gift. Moscow, Publishing house "Business Psychologists", 2010, 320 p. (in Russian).
22. Isabel Briggs Myers with Peter B. Myers. Gifts Differing: understanding personality type. Palo Alto CA: Consulting Psychologist Press, 1995, 248 p.
23. Briggs Myers, I., Mack, Collie M. H., Hammer, A. L. Typology of Mayers-Briggs. Psychology of individual differences. Ed. by Yu.B. Gippeneiter and V.J. Romanov. Moscow, CheRo, 2000, pp. 754-775. (in Russian).
24. Goldberg, LR. Language and individual differences The search for universals personality lexicons In L Wheeler (Ed), Review of personality and social psychology, 1981, Vol 2, pp. 141-165.
25. Jung K.G. Psychological types. Saint-Petersburg. Azbuka publishing house, 1996, 736 p. (in Russian).
26. Robertson R. Introduction to Jungian psychology. Rostov-on-Don, Phoenix, 1998, 320 p. (in Russian).
27. Vaganov P.S. Man, risk, security. Saint-Petersburg. St.-Petersburg State University publ., 2002, 160 p. (in Russian).
28. Hedges P. Character Analysis, or typology by Myers-Briggs. Moscow, Publishing house Eksmo, 2003, 320 p. (in Russian).

Received: April 24, 2019

For correspondence: Genrietta V. Arkhagelskaya – Doctor of Medical Sciences, Chief Researcher, Laboratory of Ecology, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights and Human Well-Being (Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: E-mail: henryark@mail.ru)

Svetlana A. Zelentsova – Junior Researcher, Laboratory of Ecology, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

For citation: Arkhagelskaya G.V., Zelentsova S.A. Ways to optimize the risk communication between specialists on radiation safety and population: recommendations on communication language. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene, 2019, Vol. 12, No. 4, pp. 72-77. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-72-77

Сравнительный анализ внешнего облучения различных профессиональных групп медперсонала г. Душанбе Республики Таджикистан

Н.У. Хакимова, Е.Ю. Малышева, Ш.Г. Шосафарова, У.М. Мирсаидов

Агентство по ядерной и радиационной безопасности Академии наук Республики Таджикистан, Душанбе, Таджикистан

В работе на основе полученных величин индивидуального эквивалента дозы $H_p(10)$ методом термолюминесцентной дозиметрии дается сравнительный анализ среднегодовых индивидуальных доз облучения за 5 лет (2014–2018 гг.) 70 сотрудников при проведении компьютерной томографии, скопии, флюорографии и рентгенографии из 15 учреждений г. Душанбе. Соотношение медперсонала профессиональных групп показало, что 63% из них занимаются рентгенографией, 19% – флюорографией, 10% – компьютерной томографией и 8% – скопией. Анализ среднегодовых доз облучения каждой профессиональной группы показал, что наибольшую дозовую нагрузку в среднем имеют специалисты, занимающиеся флюорографией (тах 1,74 мЗв), а наименьшую – компьютерной томографией (тах 1,34 мЗв), причем со временем наблюдается тенденция выравнивания значений среднегодовых доз у всех профессиональных групп в область, близкую к значению 1,5 мЗв. Полученные данные эффективной годовой дозы для всех профессиональных категорий не превышают допустимые предельные значения, установленные «Нормами радиационной безопасности» (НРБ-06 СП 2.6.1.001-06). Расчеты даны без вычета фоновых значений. Данные анализа позволяют выявлять наиболее облучаемые профессиональные группы и целенаправленно решать вопросы обеспечения радиационной безопасности.

Ключевые слова: радиационная безопасность, медперсонал, индивидуальный дозиметрический контроль, эффективная доза, термолюминесцентный метод.

Введение

Решение проблемы эффективной радиационной защиты персонала и населения Республики Таджикистан при проведении диагностических и лечебных мероприятий с использованием источников ионизирующего излучения (ИИИ) является одной из приоритетных государственных задач [1, 2]. Одним из условий обеспечения безопасной работы персонала с ИИИ является индивидуальный дозиметрический контроль (ИДК). Мониторинг необходим для выявления тенденций в уровнях облучения различных профессиональных групп, планирования мероприятий по ограничению радиационного воздействия на персонал, а базы данных мониторинга могут являться основой для проведения эпидемиологических исследований и оценок риска.

Данные ИДК дают возможность установить контрольные уровни в каждой организации для разных категорий медперсонала, чтобы, используя один из основных принципов радиационной безопасности – оптимизацию [3], предпринимать шаги по уменьшению дозовой нагрузки облучения персонала при работе с ИИИ, а в дальнейшем по возможности самих значений контрольных уровней.

Цель исследования – выявление категории медперсонала, имеющего большие дозовые нагрузки при работе с флюорографией, компьютерной томографией (КТ), скопией и рентгенографией.

Задачи исследования – анализ и сравнение полученных данных мониторинга доз индивидуального облучения медперсонала.

Материалы и методы

С целью контроля индивидуальных дозовых нагрузок на базе Агентства по ядерной и радиационной безопасности Академии наук Республики Таджикистан функционирует лаборатория контроля профессионального облучения. Мониторинг ведется методом термолюминесцентной дозиметрии (ТДЛ), где используются детекторы ТЛД-100 на основе LiF: Mg, Ti и считывающее устройство «Harshaw-4500» (США) с программным обеспечением WimREMS. В связи с естественным варьированием чувствительности термолюминесцентного материала и физической массы ТЛ элемента, отклонения показаний детекторов, подвергнутых облучению с одинаковыми ха-

Мирсаидов Улмас Мирсаидович

Агентство по ядерной и радиационной безопасности Академии наук Республики Таджикистан

Адрес для переписки: 734030, Таджикистан, г. Душанбе, ул. Хакимзода, 17 «А»; E-mail: ulmas2005@mail.ru

рактическими, от среднего значения показаний детекторов составляют $\leq 30\%$.

Результаты и обсуждение

На основе полученных величин индивидуального эквивалента дозы $H_p(10)$ проводился сравнительный анализ среднегодовых индивидуальных доз облучения 70 сотрудников за 5 лет (2014–2018 гг.) при проведении компьютерной томографии (КТ), скопии, флюорографии и рентгенографии из 15 медучреждений г. Душанбе.

При рассмотрении количественного соотношения сотрудников каждой из профессиональных групп, показанного на рисунке 1, оказалось, что наименьший процент составляют сотрудники, занимающиеся скопией (8%), а наибольший – занимающиеся рентгенографией (63%).

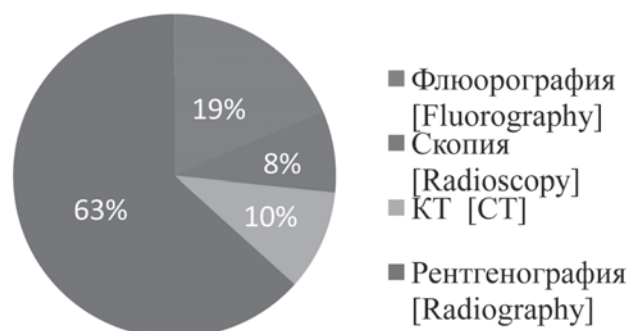


Рис. 1. Соотношение медперсонала различных профессиональных групп

[Fig. 1. The ratio of medical personnel of different professional groups]

Для сопоставления доз облучения за указанный период времени был проведен анализ минимальных и максимальных индивидуальных годовых доз. Анализ полученных минимальных и максимальных годовых доз, представленных в таблице, показал, что все профессиональные группы имели минимальные значения эффективной годовой дозы в области $\sim 0,9$ мЗв, а максимальное значение наблюдалось у медперсонала, занимающегося рентгенографией, – 4,34 мЗв.

Таблица

Минимальные и максимальные значения индивидуальной годовой эффективной дозы

Minimum and maximum values of individual annual effective dose]		
Профессиональная группа [Professional group]	Годовая доза, мЗв [Annual dose, mSv]	
	min	max
Флюорография [Fluorography]	0,90	3,45
Скопия [Radioscopy]	0,99	2,86
КТ [CT]	0,90	1,63
Рентгенография [Radiography]	0,92	4,34

[Table

Несмотря на то, что расчёт среднегодовых доз облучения каждой профессиональной группы показал, что в 2015 г. медперсонал, занимающийся скопией, имел среднюю годовую дозу 1,93 мЗв, и учитывая то, что в этот период времени скопией занималось только 2 специалиста из выбранных для исследования медучреждений, считаем, что наибольшую дозовую нагрузку в среднем имеют специалисты, занимающиеся флюорографией, а наименьшую – занимающиеся КТ (рис. 2). При этом из рисунка 2 видно, что со временем наблюдается тенденция выравнивания значений среднегодовых доз у всех профессиональных групп в область, близкую к значению 1,5 мЗв.

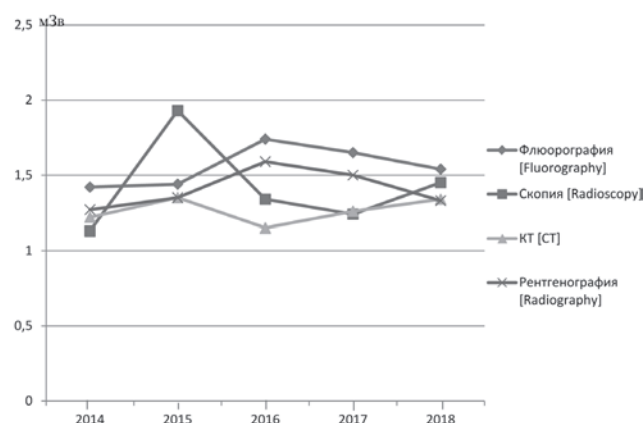


Рис. 2. Распределение среднегодовых доз облучения медперсонала различных профессиональных групп за период с 2014 по 2018 г.

[Fig. 2. Distribution of average annual radiation doses of medical personnel of different professional groups for the period from 2014 to 2018]

Все данные представлены без вычета фоновых значений, поскольку вклад природного облучения в показания индивидуальных дозиметров, как правило, не превышает 1 мЗв в год и обычно составляет 0,4–0,8 мЗв [4]. Если вычесть даже минимальное значение фона 0,4 мЗв из максимальной средней годовой дозы 1,93 мЗв, то полученная среднегодовая доза будет составлять 1,53 мЗв, что не превышает допустимые предельные значения, установленные «Нормами радиационной безопасности» (НРБ-06 СП 2.6.1.001-06) [5].

Заключение

В ходе исследования было установлено, что из 70 медицинских сотрудников 15 медицинских учреждений г. Душанбе, использующих ИИИ, 63% занимаются рентгенографией, 19% – флюорографией, 10% – компьютерной томографией и 8% – скопией. При этом выявлено, что наибольшую дозовую нагрузку в среднем имеют специалисты, занимающиеся флюорографией (max 1,74 мЗв), а наименьшую – занимающиеся компьютерной томографией (max 1,34 мЗв), причем со временем наблюдается тенденция выравнивания значений среднегодовых доз у всех профессиональных групп в область, близкую к значению 1,5 мЗв. Полученные данные эффективной годовой дозы для всех профессиональных категорий не превышают допустимые предельные значения, установленные «Нормами радиационной безопасности» (НРБ-06 СП 2.6.1.001-06).

Данные анализа позволяют выявлять наиболее облучаемые профессиональные группы и целенаправленно решать вопросы обеспечения радиационной безопасности.

Литература

1. Сборник законов (в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности). – Душанбе.: ООО «Мехрона 2017», 2017. – 258 с.
2. Нормативные правовые акты (в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности). – Душанбе.: ООО «Мехрона 2017», 2018. – 174 с.
3. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер с англ. /Под общей ред. Киселёва М.Ф., Шандалы Н.К. – М.: Изд-во ООО ПКФ «Алана», 2009. – С.94.
4. Барковский, А.Н. О целесообразности отказа от вычитания показаний фоновых дозиметров из измеренных значений индивидуальных доз производственного облучения персонала группы А / А.Н. Барковский // Радиационная гигиена. – 2013. – Т. 6, № 3. – С. 56-58.
5. «Нормы радиационной безопасности» (НРБ-06 СП 2.6.1.001-06): утв. Министерством юстиции РТ, №237 от 16.01.07.

Поступила: 16.04.2019 г.

Хакимова Ноди́ра Умаровна – кандидат химических наук, заведующая Сектором контроля профессионального облучения Отдела научно-исследовательских и технических услуг Агентства по ядерной и радиационной безопасности Академии наук Республики Таджикистан, Душанбе, Таджикистан

Малышева Елена Юрьевна – ведущий инженер Сектора контроля профессионального облучения Отдела научно-исследовательских и технических услуг Агентства по ядерной и радиационной безопасности Академии наук Республики Таджикистан, Душанбе, Таджикистан

Шосафарова Шоира Гулмахмадовна – ведущий инженер Сектора контроля профессионального облучения Отдела научно-исследовательских и технических услуг Агентства по ядерной и радиационной безопасности Академии наук Республики Таджикистан, Душанбе, Таджикистан

Мирсаидов Улмас Мирсаидович – доктор химических наук, академик Академии наук Республики Таджикистан, научный консультант Агентства по ядерной и радиационной безопасности Академии наук Республики Таджикистан.

Адрес для переписки: 734030, Таджикистан, г. Душанбе, ул. Хакимзода, 17 «А»; E-mail: ulmas2005@mail.ru

Для цитирования: Хакимова Н.У., Малышева Е.Ю., Шосафарова Ш.Г., Мирсаидов У.М. Сравнительный анализ внешнего облучения различных профессиональных групп медперсонала г. Душанбе Республики Таджикистан // Радиационная гигиена. – 2019. – Т. 12, № 4. – С. 78–81. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-78-81

Comparative analysis of the external exposure of different professional groups of medical staff of Dushanbe city of the Republic of Tajikistan

Nodira U. Khakimova, Elena Yu. Malysheva, Shoira G. Shosafarova, Ulmas M. Mirsaidov

Nuclear and Radiation Safety Agency of Academy Sciences of the Republic of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

The work provides a comparative analysis of average annual individual radiation doses based on the obtained values of individual dose equivalent $H_p(10)$, which had been obtained during 5 years of investigations (2014-2018) by using the thermo-luminescent dosimetry method of 70 employees working computed tomography, radioscopy, fluorography and radiography from 15 medical institutions in Dushanbe city. The ratio of medical personnel of the different professional groups showed that 63% of them were engaged in radiography, 19% x-ray, 10% computed tomography and 8% radioscopy. Analysis of the average annual radiation doses of every occupational group showed that the specialists in charge of fluorography have a high dose (max 1.74 mSv) and the personal of computed tomography have the lowest dose (max 1.34 mSv), and over time there is a tendency to equalize the values of average annual doses for all professional groups in the area close to the value of 1.5 mSv. The obtained data of the effective annual dose for all occupational categories had not exceeded the permissible dose limits values required by the «Radiation Safety Standards» (NRB-06 SP 2.6.1.001-06).

Ulmas M. Mirsaidov

Nuclear and Radiation Safety Agency of Academy Sciences of the Republic of Tajikistan

Address for correspondence: ul. Khakimzoda 17 «A», Dushanbe, 734030, Tajikistan; E-mail: ulmas2005@mail.ru

Calculations are given without subtracting background values. The analysis data allows to identify the most exposed professional groups and to address the issues of ensuring radiation safety in a targeted manner.

Key words: radiation protection, medical staff, individual dose control, effective dose, thermo-luminescence method.

References

1. Collection of laws (in the field of nuclear and radiation safety). – Dushanbe: LLC «Mehrona 2017», 2017. – 258 s. (in Russian).
2. Normative legal acts (in the field of nuclear and radiation safety). Dushanbe: LLC «Mehrona 2017», 2018, 174 p. (in Russian).
3. ICRP. 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4), 2007 (in Russian).
4. Barkovsky A.N. About the expediency of refusing to subtract the readings of background dosimeters from the measured values of individual doses of occupational exposure to personnel of group A. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2013; Vol. 6, № 3, pp. 56-58 (in Russian).
5. «Norms of the Radiation Safety» (NRB-06 SP 2.6.1.001-06): approved by the Ministry of Justice of the Tajikistan Republic, №237, 16.01.07 (in Russian).

Received: April 16, 2019

Nodira U. Khakimova – PhD, head of the Sector of the control of the staff exposure of the Department of the scientific-research and technical services of the Agency of the nuclear and radiation safety of the Academy of Sciences of the Tajikistan Republic, Dushanbe, Tajikistan

Elena Yu. Malysheva – Lead engineer of the Sector of the control of the staff exposure of the Department of the scientific-research and technical services of the Agency of the nuclear and radiation safety of the Academy of Sciences of the Tajikistan Republic, Dushanbe, Tajikistan

Shoira G. Shosafarova – Lead engineer of the Sector of the control of the staff exposure of the Department of the scientific-research and technical services of the Agency of the nuclear and radiation safety of the Academy of Sciences of the Tajikistan Republic, Dushanbe, Tajikistan

For correspondence: Ulmas M. Mirsaidov – Doctor of chemical sciences, academic of the Academy of Sciences of the Tadzhikistan Republic, scientific consultant of the Agency of the nuclear and radiation safety of the Academy of Sciences of the Tajikistan Republic (ul. Khakimzoda 17 «A», Dushanbe, 734030, Tajikistan; E-mail: ulmas2005@mail.ru)

For citation: Khakimova N.U., Malysheva E.U., Shosafarova Sh.G., Mirsaidov U.M. Comparative analysis of the external exposure of different professional groups of medical staff of Dushanbe city of the Republic of Tajikistan. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene, 2019, Vol. 12, No. 4, pp. 78-81. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426x-2019-12-4-78-81

Кулинарная обработка сушеных грибов как эффективный способ снижения содержания в них цезия-137

К.В. Варфоломеева

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 данного научного исследования являлось изучение эффективности кулинарной обработки (мытья, замачивания и варки) грибов для снижения содержания цезия-137. Для исследования были выбраны трубчатые сушеные грибы: белый гриб, боровик, дубовик, масленок, моховик, подберезовик, подосиновик и польский гриб, собранные в 2016 г., на территориях Брянской области (Гордеевский, Клинцовский, Красногорский районы), подвергшихся наибольшему загрязнению в результате аварии на ЧАЭС. Определение активности цезия-137 проводилось методом гамма-спектрометрии. Эффективность кулинарной обработки оценивалась посредством расчета коэффициента кулинарного снижения, равного отношению активности цезия-137 в водной фракции и активности в исходной пробе сухих грибов. Результаты экспериментальной работы показали, что наиболее эффективным способом кулинарной обработки сушеных грибов является мытье, с его помощью содержание цезия-137 в грибах снижается на 49%. При этом большая часть цезия-137 переходит в водную фракцию с первым сливом — 32%, с последующими двумя — в воду переходит 11% и 6% соответственно. При замачивании грибов в течение 3 ч в водную фракцию переходит 26% цезия-137, из которых 14% — в первый час, 9% — во второй час и 3% — в третий час замачивания. Увеличение времени замачивания сушеных грибов является малоэффективным для снижения содержания в них цезия-137. Использование всех этапов кулинарной обработки сушеных грибов (мытья, замачивания и варки) приводит к снижению содержания цезия-137 в грибном бульоне на 75%.

Ключевые слова: лесные грибы, коэффициент кулинарного снижения ($K_{\text{сн}}$), методы кулинарной обработки, радиоактивное загрязнение, цезий-137, активность, удельная активность, авария на Чернобыльской АЭС, Брянская область.

Введение

Результаты многочисленных исследований показывают, что в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС проблема загрязнения пищевых продуктов леса, произрастающих на территориях, пострадавших в результате аварии, не теряет своей актуальности [1]. Потребление в пищу лесных грибов вносит заметный вклад (от 75% до 82%) в дозу внутреннего облучения населения [2–5].

Одной из основных задач по обеспечению радиационной безопасности населения, проживающего на загрязненных в результате аварии территориях, является снижение вклада пищевых продуктов в дозу внутреннего облучения, в том числе от потребления продуктов лесного происхождения (в частности, грибов).

Одной из контрмер, применяемой для снижения дозовых нагрузок внутреннего облучения населения от потребления грибов, является их кулинарная обработка. Согласно литературным данным [6–14], обычно применя-

емые на практике способы первичной кулинарной обработки (мытья, замачивание, варка, соление, маринования и др.) обеспечивают снижение содержания цезия-137 в грибах от 20% до 97% от его первоначального содержания, а значит, и уменьшают вклад в дозу внутреннего облучения населения от их потребления. В отличие от вышеперечисленных способов заготовки грибов, сушка приводит к сохранению и концентрированию активности цезия-137 в грибах (от 3 до 10 раз) [7, 10].

Сушение грибов является одним из наиболее популярных и простых способов их кулинарной обработки населением. Благодаря этому способу грибы могут храниться более продолжительное время (до нескольких лет) и при этом не утрачивают свои питательные и вкусовые качества. Сушеные грибы используются населением для приготовления разнообразных блюд, как первых (супы), так и вторых (соусы и др.). Соответственно, способы их кулинарной обработки могут меняться. Так, при использовании грибного порошка или грибной муки

Варфоломеева Ксения Владимировна

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

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

сушеные грибы не подвергаются влажной обработке (высушенные грибы измельчаются и далее используются для добавления в разнообразные блюда). При приготовлении первых блюд, как правило, используется та же вода, в которой они вымачивались, что улучшает наваристость и вкусовые качества супа.

Закономерности снижения содержания цезия-137 в сушеных грибах посредством кулинарной обработки показаны в научных работах белорусских и украинских коллег [9–12]. Согласно исследованиям, представленным в этих работах, обработка сушеных грибов (мытьё, вымачивание, варка) позволяет значительно снизить содержание цезия-137 в готовом продукте (бульоне). Согласно полученным данным [12], мытьё способствует переходу 62,4% цезия-137 из сушеных грибов в водный раствор, после их вымачивания в течение 0,5, 2 и 10 ч в водную фракцию мигрирует от 85,3 до 98,94% цезия-137 соответственно. При их дальнейшем кипячении (в течение 15 мин и 1 ч) в грибах остается от 0,21 до 0,27% первоначально измеренного цезия-137 (в сушеных грибах). По результатам работ других исследователей [10], вымачивание грибов в течение 6–12 ч с последующим их отвариванием снижает содержание цезия-137 в них на 50%. При двукратном вымачивании и последующем двукратном отваривании сушеных грибов происходит снижение содержания в них цезия-137 до 8–10 раз. Максимального снижения содержания цезия-137 в сушеных грибах можно добиться путем их дву- или трехкратного вымачивания и последующего дву- или трехкратного отваривания [9, 11].

Дальнейшее изучение закономерностей снижения содержания цезия-137 в грибах на разных этапах их кулинарной обработки позволит оптимизировать режимы обработки и дать соответствующие рекомендации для населения.

Цель исследования – изучение эффективности кулинарной обработки сушеных грибов на различных стадиях их мытья, замачивания и варки.

Материалы и методы

Для исследований были выбраны 9 проб трубчатых сушеных грибов разных видов (белый гриб, боровик, дубовик, масленок, моховик, подберезовик, подосиновик и польский гриб). Пробы были собраны во время экспедиционных исследований в 2016 г. на территориях юго-западных районов Брянской области (Гордеевский, Клиновский, Красногорский), подвергшихся наибольшему загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Для отбора проб выбирали наиболее посещаемые местными жителями лесные участки, различающиеся между собой удаленностью от населенных пунктов от 0,3 до 5 км, с плотностями поверхностного загрязнения цезия-137 почвы от 33 до 944 кБк/м² (ориентировочные уровни поверхностного загрязнения почвы в лесах оценены по результатам гамма-спектрометрических измерений отобранных проб почвы). Идентификацию вида грибов проводили по общепринятым признакам, описанным в справочной литературе [16]. Подготовку проб грибов к измерениям на гамма-спектрометре проводили согласно аттестованной методике выполнения измерений [17]. Пробы сырых грибов перед сушкой проходили

этап сухой механической обработки (грибы тщательно осматривали, отбраковывали и выбрасывали червивые, у оставшихся вырезали размякшие и поврежденные (грызунами, насекомыми и слизнями) места, очищали грибы от остатков леса (почвы, песка, листьев, мелких веточек и др.), одновременно подрезали ножки грибов, соскабливая с них верхний слой. Затем шел этап сортировки (очищенные грибы делили на разные виды) с последующим взвешиванием сырой массы каждой измеряемой пробы грибов. Сортированные пробы грибов сушили в специализированной электрической сушилке при температуре 50–60 °С примерно 9–12 ч. Все высушенные пробы грибов снова взвешивали, а затем измеряли на гамма-спектрометре. Для исследования брали пробы с большими удельными активностями от 1 700 Бк/кг до 16 400 Бк/кг (табл.). Далее шла их кулинарная обработка с последовательным измерением пробы на гамма-спектрометре после каждого этапа:

I. *Мытьё* – для удаления с поверхности высушенных грибов остатков лесного сора их замачивали в холодной воде (200 мл) на 10–15 мин, затем дважды промывали чистой водой, сливаемую после каждого процесса воду измеряли на гамма-спектрометре, а сами грибы использовали в следующем этапе кулинарной обработки – замачивании (этап восстановления).

II. *Замачивание* – пробы сушеных грибов замачивали в холодной воде при комнатной температуре на 1, 2 и 3 ч. Каждый час (в течение 3 ч) вода из них сливалась и измерялась на гамма-спектрометре, грибы после каждого этапа заливались свежей водой. В экспериментальной работе мы подробно рассмотрели изменения содержания цезия-137 на каждом этапе приготовления блюда из сушеных грибов;

III. *Варка* – грибы варили на слабом огне (от 40 мин до 2 ч). После завершения каждого этапа кулинарной обработки грибы отделяли от водной фракции с помощью дуршлага. Затем грибы переходили на следующий этап обработки, а сам дуршлаг тщательно промывался под проточной водой. Определение удельной активности цезия-137 проводилось методом гамма-спектрометрии, измерения проводили по методике выполнения измерений [17] с помощью сцинтилляционного гамма-спектрометра СЕГ-04Т, состоящего из блока детектирования МКГБ-01 №006, АЦП MD198 № 6. Минимальная детектируемая активность (МДА) составляла 2 Бк на пробу при времени измерения 1 ч. Обработка спектров проводилась с помощью программного обеспечения ASW. Статистическая обработка данных осуществлялась средствами MS Excel. Количественный учет снижения содержания цезия-137 в процессе кулинарной обработки сушеных грибов производился с помощью коэффициента кулинарного снижения ($K_{\text{сн}}$), равного отношению между количеством цезия-137 в водной фракции после каждого этапа кулинарной обработки и его количеством в сухих грибах.

Результаты и обсуждение

В таблице приведены результаты оценки эффективности кулинарного снижения содержания цезия-137 для всех перечисленных выше этапов.

Полученные результаты (см. табл.) наглядно показывают, что на каждом этапе кулинарной обработки происходит постепенное снижение содержания цезия-137 в грибах.

Таблица
Содержание цезия-137 и его коэффициент кулинарного снижения в грибах и их водной фракции при разных этапах кулинарной обработки различных видов сушеных грибов
[Table
Concentration of ^{137}Cs and its coefficient of cooking reduction in mushrooms and their water fraction from different stages]

Виды грибов (рус./лат.) [Mushroom species (rus. / lat.)]	УА, Бк/кг [Activity concen- tration, Bq/kg]	Масса пробы, г [Sample mass, g]	Сырой гриб [Raw mush- rooms]	Сушеный гриб [Dried mush- rooms]	Исходная проба [Initial sample]	А пробы ± ошибка (Бк), K _{сух} , K _{вымачивания} [A sample ± error (Bq), K _{red} , K _w]						Варка [Boiling]
						Мытье (водная фракция) [Washing (water fraction)]			Замачивание (водная фракция) [Soaking (water fraction)]			
						I слив [Decanting]	II слив [decanting]	III слив [decanting]	1 час [hour]	2 часа [hours]	3 часа [hours]	
Подберёзовик [<i>Leccinum scabrum</i>]	183	34,7 (17,2)	2 200		38±8	14 ±3	6 ±2	4 ±1	6 ±1	3 ±1	3 м.д.а. [m.d.a.]	1±1
Белый гриб [<i>Boletus edulis</i>]	354	47 (25)	9 300		100	37	16	11	16	8	3	3
Подберёзовик [<i>rough boletus</i>] (<i>Leccinum scabrum</i>)	341	42,5 (21,5)	1 900		234 ±47	71 ±14	25 ±5	9 ±2	34 ±7	19 ±4	10 ±2	18±4
Моховик [<i>variegated boletus</i>] (<i>Xerocomus chrysenteron</i>)	229	31 (15)	5 400		100	30	11	4	15	8	4	8
Польский гриб [<i>Bay bolete</i>] (<i>Xerocomus badius</i>)	259	59 (31)	15000		41 ±8	15 ±3	6 ±1	3 ±1	5 ±1	3 ±1	3 м.д.а. [m.d.a.]	1±1
Боровик [<i>Porcini</i>] (<i>Boletus Betulicola</i>)	нас. **	55 (28)	1 700		100	37	15	7	12	7	2	2
Подосиновик [<i>orange-cup boletus</i>] (<i>Leccinum aurantiacum</i>)	438	52 (25)	4 300		81 ±16	41±8	18 ±4	5 ±1	14 ±3	6 ±1	3 ±1	3±1
					100	51	22	7	17	7	4	4
					465 ±93	143 ±29	10 ±2	13 ±3	19 ±4	65±13	23 ±5	25±5
					100	31	2	3	4	14	5	5
					47 ±10	14±3	8 ±2	6 ±1	5 ±1	4 ±1	4 м.д.а. [m.d.a.]	2±1
					100	30	17	13	11	9	1	4
					107 ±22	27 ±6	7 ±2	7 ±2	22 ±5	12±3	м.д.а. [m.d.a.]	11±3
					100	25	7	7	21	11	0,1	10

Виды грибов (рус./лат.) [Mushroom species (rus. /lat.)]	Масса пробы, г [Sample mass, g]	УА, Бк/кг [Activity concentration, Bq/kg]	А пробы ± ошибка (Бк), K _{ср} (K _{вымывания} ¹³⁷ Cs (%)) [A sample ± error (Bq), K _{red} K ₁₃₇ Cs (%)]											
			Сырой гриб [Raw mushroom]	Сушеный гриб (аликвота) [Dried mushroom, aliquot]	Сушеный Гриб [Dried mushroom]	Исходная проба [Initial sample]		Мытье (водная фракция) [Washing (water fraction)]			Замачивание (водная фракция) [Soaking (water fraction)]			Варка [Boiling]
						Сушеный гриб [Dried mushrooms]	слив [Decanting]	I слив [Decanting]	II слив [decanting]	III слив [decanting]	1 час [hour]	2 часа [hours]	3 часа [hours]	
Дубовик [Lurid boletus] (<i>Boletus erythropus</i>)	396	47 (23)	5 100	117 ±24 100	28 ±6 24	9 ±2 8	3 ±1 3	20 ±4 17	10 ±2 9	5 ±1 4	32±7	15	5±1	
Маслёнок [annulated boletus] (<i>Suillus luteus</i>)	205	25 (13)	16 400	213 ±43 100	41 ±8 19	7 ±2 3	6 ±1 3	37±8 5-37	26 ±6 12	11 ±3 5	32±7	15	5±1	
Разброс значений (min-max), A ¹³⁷ Cs, Бк [Variation of values (min-max) A ¹³⁷ Cs, Bq]				38–465	14– 143	6–25	3–13	5–37	3–65	м.д.а.-23 [m.d.a.-23]	1-32	6	5±1	
Среднее значение, % [Mean value, %]						32	11	6	14	9	3	6	5±1	
Стандартное отклонение, % [Standard deviation, %]						9	7	4	5	2	2	4	5±1	
Сумма, % [Sum, %]				100		49***			26***		6***	6	5±1	

* – водная фракция и грибы;

** – сырой вес грибов не известен, так как проба была взята у населения;

*** – отсутствие баланса суммарной активности цезия-137 в пробах промежуточных этапов с исходной его активностью в пробах сушеных грибов объясняется тем, что в процессе кулинарной обработки одна часть цезия-137 вместе с мельчайшими остатками грибов оседала на стенках стеклянной посуды (используемой при промывании и вымачивании сушеных грибов), еще одна часть задерживалась на стенках дуршлага (при отделении грибов от водной фракции). Затем в процессе тщательного промывания посуды и дуршлага под проточной водой осевшая на них часть смывалась.

* Water fraction and mushrooms

** raw mass of the mushrooms was unknown as the sample was received from the public

*** the total activity concentration of ¹³⁷Cs in the intermediate stage samples is not balanced with the initial activity in the dry mushrooms samples. It can be explained by the following processes: during the cooking part of ¹³⁷Cs subsided on the walls of the glass-ware (during the washing and soaking of the mushrooms); another part subsided on the walls of the colander (during the removing of the water fraction). After careful washing of the glass-ware and colander with the water subsided fraction was washed down.]

Тенденция снижения содержания цезия-137 в разных видах грибов, представленных в данной выборке, наблюдается вплоть до конечного продукта потребления (грибного бульона).

Как видно из результатов расчета средних значений коэффициентов снижения, наиболее эффективной стадией обработки является мытье. Содержание цезия-137 на этой стадии снижается на 49%, из которых 32% переходит в водную фракцию с первым сливом, а оставшиеся 17% – с последующими двумя.

На этапе замачивания из грибов в водную фракцию переходит 26% цезия-137. На этом этапе также прослеживается постепенное снижение эффективности очистки цезия-137 со временем вымачивания: в первый час в водную фракцию переходит 14% цезия-137, во второй час – 9%, а в третий час – 3%.

На последней стадии кулинарной обработки – варке в грибной бульон переходит около 6% от первоначально измеренного содержания цезия-137 в сухих грибах.

Результаты проведенной экспериментальной работы показали, что при соблюдении полного технологического процесса кулинарной обработки разных видов сушеных грибов (мытья, замачивание, варки) можно более чем на 75% уменьшить содержание в них цезия-137 от его исходного значения. В конечном продукте (супе) его останется 6% (см. табл.). Следует сказать, что, как правило, при приготовлении супов из сушеных грибов вода после 1-, 2- и 3-часового замачивания не выливается, а используется в блюде для усиления его вкусовых качеств. В этом случае 26% цезия-137 будет потребляться вместе с супом.

Выводы

1. Наиболее эффективным способом кулинарной обработки сушеных грибов является мытье, с его помощью снижается содержание цезия-137 в грибах на 49%. При этом большая часть цезия-137 переходит в водную фракцию с первым сливом – 32%, с последующими двумя в воду переходит 11% и 6% соответственно.

2. При замачивании грибов в течение 3 ч в водную фракцию переходит 26% цезия-137, из которых 14% – в первый час, 9% – во второй час и 3% – в третий час замачивания. Увеличение времени замачивания сушеных грибов является не только малоэффективным для снижения содержания в них цезия-137, но и ухудшает вкусовые качества приготовленного блюда.

3. Использование всех этапов кулинарной обработки сушеных грибов (мытья, замачивания и варки) приводит к снижению содержания цезия-137 в грибном бульоне на 75%.

Литература

1. Мамихин, С.В. Роль макромицетов как накопителей ¹³⁷Cs в лесных экосистемах / С.В. Мамихин / Радиационная биология. Радиоэкология. – 2012. – Т. 52, № 5. – С. 546-552.
2. Кадука, М.В. Динамика содержания радиоактивного цезия в пищевых продуктах / М.В. Кадука, В.Н. Шутов // Радиационно-гигиенические аспекты преодоления последствий аварии на Чернобыльской АЭС: под редакцией академика РАН Г.Г. Онищенко и профессора А.Ю. Поповой. – СПб.: НИИРГ имени профессора П.В. Рамзаева, 2016. – Т.1. – С. 143-157.
3. Пономаренко, В.В. Вклад продукции леса в формирование доз внутреннего облучения населения, проживающего на радиоактивно загрязненных территориях / В.В. Пономаренко, А.В. Панов, Е.В. Гордиенко // Актуальные проблемы лесного комплекса: под общей редакцией Е.А. Памфилова. Сборник научных трудов. – Брянск: БГИТА, 2015. – Выпуск 41. – С. 141-144.
4. Шабалева, М.А. Сравнительный анализ лесной пищевой продукции и ее вклад в дозу внутреннего облучения организма жителей Гомельской и Могилевской областей / М.А. Шабалева, Н.И. Булко, А.К. Козлов // Проблемы здоровья и экологии. – 2016. – С. 91-95.
5. Варфоломеева, К.В. Роль грибов как долговременного источника формирования доз внутреннего облучения населения, проживающего на загрязненных территориях Юго-Западных районов Брянской области / К.В. Варфоломеева // Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 150-летию кафедры общей и военной гигиены с курсом военно-морской и радиационной гигиены Военно-медицинской академии С.М. Кирова: Сборник материалов. – СПб: ВМедА, 2015. – С. 119-120.
6. Шутов, В.Н. Защита от радиации: Научное пособие / В.Н. Шутов, М.В. Кадука, О.С. Кравцова [и др.]. – 2011. – 88 с.
7. Варфоломеева, К.В. Содержание цезия-137 в домашних заготовках грибов в 2014 году у жителей территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению после аварии на ЧАЭС / К.В. Варфоломеева // Радиационная гигиена. – 2015 – Т. 8, №3. – С. 47-55.
8. Кадука, М.В. Рекомендации по снижению содержания радионуклидов в пищевых продуктах в отдаленный период после аварии / М.В. Кадука, В.Н. Шутов // Радиационно-гигиенические аспекты преодоления последствий аварии на Чернобыльской АЭС: под редакцией академика РАН Г.Г. Онищенко и профессора А.Ю. Поповой. – СПб.: НИИРГ имени профессора П.В. Рамзаева, 2016. – Т.1. – С. 277-290.
9. Дворник, А.М., Модель Forestdose-internal формирования внутренней дозы облучения от леса / А.М. Дворник, Т.А. Жученко // Проблеми екології лісу і лісокористування на Поліссі України. – Житомир: Волинь, 2000. – Вип. 1 (7). – С. 139-148.
10. Пояснительная записка. Экспериментальные исследования снижения содержания цезия-137 в пищевой продукции леса (грибы) методами кулинарной обработки. Государственное учреждение радиационного контроля и радиационной безопасности «БЕЛЛЕСРАД». Международный государственный университет им. А.Д. Сахарова. Минск, 2005 г. – 25 с.
11. Бакайтис, В.И. Влияние замачивания на снижение содержания тяжелых металлов в грибах / В.И. Бакайтис, С.Н. Че // Техника и технология пищевых производств. – 2012 г. – №4. С. 1-3..
12. Korzun, V.N. Заходи з мінімізації дози внутрішнього опромінення населення (огляд літератури, повідомлення) / V.N. Korzun // Environment and health. – 2012. – № 1. – С. 13-20..
13. Правила ведения лесного хозяйства в зонах радиоактивного загрязнения. Официальный сайт Государственного лесохозяйственного учреждения «Новогрудский лесхоз»: <http://novogrudokleshoz.by/?s=Правила+ведения+лесного+хозяйства+в+зонах+радиоактивного+загрязнения>. (дата обращения: 15.03.2019);
14. Корзун, В.Н. Гігієнічна проблема профілактики внутрішнього опромінення організму при хронічному аліментарному надходженні радіонуклідів цезію і стронцію: автореф. дис. / В.Н. Корзун. – К., 1995. – 40 с.
15. Корзун, В.Н. Рациональное питание и технология приготовления блюд при радиационном заражении окружающей среды / В.Н. Корзун // Здоровье и питание. – 1998. – № 2. – С. 12-13.
16. Гминдер, А. Грибы: Иллюстрированный справочник / А. Гминдер, Т. Бёнинг; Перевод с немецкого Н. Лилиенталь. – Мытищи: ЗАО «БММ», 2007. – 318 с.

17. Удельная активность цезия-137 и стронция-90 в пробах пищевой и сельскохозяйственной продукции, почвы и

других объектах внешней среды: Методика выполнения измерений. СПб: ФГУН НИИРГ, 2008 г. – 21 с.

Поступила: 09.04.2019 г.

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

Для цитирования: Варфоломеева К.В. Кулинарная обработка сушеных грибов как эффективный способ снижения содержания в них цезия-137 // Радиационная гигиена. – 2019. – Т.12, № 4. – С. 82–88. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-82-88

Cooking of the dried mushrooms as an effective solution for the reduction of the ^{137}Cs concentration

Kseniya V. Varfolomeeva

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

*The aim of the current study was to evaluate the effectiveness of cooking (washing, soaking and boiling) of the mushrooms to reduce the ^{137}Cs concentration. The following tubular dried mushrooms were selected for the study: *Boletus edilus* (cepe), *porcini lurid boletus*, *annulated boletus*, *orange-cup boletus*, *variegated boletus* and *bay bolete*. The mushrooms were collected in 2016 in the Bryansk region areas (Gordeevsky, Klintzovsky and Krasnogorskiy districts) with the maximum contamination after the Chernobyl NPP accident. The activity concentration of ^{137}Cs was determined by gamma-spectrometry. Effectiveness of cooking was assessed by calculating the coefficient of cooking reduction equal to the ratio of the activity of ^{137}Cs in water fraction to the activity in the initial dried mushroom sample. The results of the study indicated that the most effective way of cooking the mushrooms was washing, allowing reducing the concentration of ^{137}Cs by 49%. The major part of ^{137}Cs was transferred to the water fraction with the first decanting – 32%; with the consecutive two decantings – 11% and 6%, respectively. During the soaking of mushrooms, 26% of ^{137}Cs is transferred into the water fraction within the first 3 hours: 14% – during the first hour, 9% – in the second and 3% – in the third. Increase in the soaking time had low effect on the reduction of the concentration of ^{137}Cs and reduced the taste characteristics of the meal. The complex use of all three stages of cooking (washing, soaking and boiling) allows reducing the concentration of ^{137}Cs up to 75% in the mushroom broth.*

Key words: forest mushrooms, coefficient of cooking reduction, methods of cooking, radioactive contamination, ^{137}Cs , activity, activity concentration, Chernobyl NPP accident, Bryansk region.

References

1. Mamikhin S.V. the role of macromyceta as the collectors of ^{137}Cs in forest ecosystems. Radiation biology. Radioecology, 2012, vol. 52, No 5, pp. 546-552. (In Russian)
2. Kaduka M.V., Shutov V.N. Dynamics of the concentration of the radioactive cesium in the food products. Radiation-hygienic aspects of the negotiation of the consequences of the Chernobyl NPP accident. Ed. By academic of RAS G.G. Onishenko and prof. A.Yu. Popova. St-Petersburg, NIIRG after prof. P.V. Pamzaev, 2016, vol. 1, pp. 143-157. (In Russian)
3. Ponomarenko V.V., Panov A.V., Gordienko E.V. Contribution of the forest products to the doses from internal exposure of the public residing on the radioactively contaminated areas. Actual problems of the forest system. Ed. By E.A. Pamphylov. Proceedings. Bryansk, BGITA, 2015, Issue 41, pp. 141-144. (In Russian)
4. Shabaleva M.A., Bulko N.I., Kozlov A.K. Comparative analysis of the forest food products and its contribution to the dose from internal exposure of the residents of Gomel and Mogilev regions. Problemy zdorov'ya i ekologii = Issues of health and ecology, 2016, pp. 91-95. (In Russian)
5. Varfolomeeva K.V. The role of mushrooms as a long-term source of doses of the internal exposure of the public residing on the contaminated areas of the South-Western areas of Bryansk regions. Materials of the All-Russian scientific-

Kseniya V. Varfolomeeva

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

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

- practical conference on the 150 year anniversary of the cathedra of the common and military hygiene with the course of navy and radiation hygiene of the Military Medical Academy after S.M. Kirov. St-Petersburg, VMA, 2015, pp.119-120. (In Russian)
6. Shutov V.N., Kaduka M.V., Kravtsova O.S. [et al.] Protection from radiation: a handbook, 2011, 88 p. (In Russian)
 7. Varfolomeeva K.V. Content of Cs-137 in homemade preserves of mushrooms picked in 2014 by local residents in areas affected by radioactive contamination after Chernobyl NPP accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(3):47-55. (In Russian)
 8. Kaduka M.V., Shutov V.N. recommendations on the reduction of the concentration of the radionuclides in food products in the distant post-accidental period. Radiation-hygienic aspects of the negotiation of the consequences of the Chernobyl NPP accident. Ed. By academic of RAS G.G. Onischenko and prof. A.Yu. Popova. St-Petersburg, NIIRG after prof. P.V. Pamzaev, 2016, Vol. 1, pp. 277-290. (In Russian)
 9. Dvornik A.M., Zhuchenko T.A. The model Forestdose-internal of the internal dose from the forest. Problems of the ecology of the forest in the Polesye region of Ukraine, Vol. 1(7), Zhitomir, Volin, 2000, pp. 139-148. (In Ukrainian)
 10. A report. Experimental studies on the reduction of ¹³⁷Cs concentration in the forest food products (mushrooms) by cooking. Governmental facility of the radiation control and radiation safety "BELLESRAD". International state university after A.D. Sakharov, Minsk, 2005, 25 p. (In Russian)
 11. Bakaytis V.I., Che S.N. Impact of soaking on the reduction of the concentration of heavy metals in mushrooms. Equipment and technology of the food production, 2012, No.4, pp. 1-3. (In Russian)
 12. Korzun, V.N. Approaches to the reduction of the doses from internal exposure of the public (a meta-analysis). *Environment and health*, 2012, № 1, pp. 13-20. (In Ukrainian)
 13. The rules of the forestry activities in the zones of the radioactive contamination. Official webpage of the State forestry facility "Novogrudsky forestry". – Available on: <http://novogrudokleshoz.by/?s=Правила+ведения+лесного+хозяйства+в+зонах+радиоактивного+загрязнения> (Accessed: 15.03.2019) (In Russian)
 14. Korzun V.N. Hygienic problems of the prophylactics of the internal exposure of the individual from chronic exposure by cesium and strontium. Abstract of thesis. Kiev, 1995, 40 p. (In Ukrainian)
 15. Korzun V.N. Rational diet and cooking technology considering the radioactive contamination of the environment. *Zdorovie i pitanie = Health and diet*, 1998, No.2, pp. 12-13. (In Russian)
 16. Gminder A., Bening T. Mushroom. An illustrated compendium. Translated from German by N. Liliental. Mititschi, ZAO "BMM", 2007, 318 p. (In Russian)
 17. Activity concentration of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in the samples of food and agriculture products, soil and other environmental objects. Method of measurement. St-Petersburg, FGUN NIIRG, 2008, 21 p. (In Russian)

Received: April 09, 2019

For correspondence: Kseniya V. Varfolomeeva – Junior Researcher, Laboratory of Ecology, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights and Human Well-Being (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: varfolomeeva_k@mail.ru)

For citation: Varfolomeeva K.V. Cooking of the dried mushrooms as an effective solution for the reduction of the ¹³⁷Cs concentration. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2019, Vol. 12, No. 4, pp. 82-88. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426x-2019-12-4-82-88

Измерение поглощенной дозы в коже пациентов, подвергающихся интервенционным исследованиям, с помощью радиохромных пленок Gafchromic XR-RV3

С.С. Сарычева

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

Данная работа посвящена оценке поглощенной дозы в коже пациентов, подвергающихся интервенционным рентгенологическим исследованиям. В связи с высокими дозами облучения при проведении данного вида медицинских исследований может существовать вероятность возникновения детерминированных эффектов в коже пациентов. Целью данной работы было проведение прямых измерений поглощенной дозы в коже пациентов, подвергающихся интервенционным рентгенологическим исследованиям с помощью специальных дозиметрических радиохромных пленок Gafchromic XR-RV3 для визуализации распределения облучения по поверхности кожи пациентов и изучения возможности превышения пороговых значений для возникновения детерминированных эффектов в коже. В работе рассмотрены особенности проведения измерений с помощью радиохромных пленок Gafchromic XR-RV3. Апробирована методика оцифровки пленки с помощью обычного планшетного сканера с последующей обработкой изображений в программе ImageJ, представлена полученная калибровочная кривая для данного типа пленки. Продемонстрированы распределения дозы в коже при проведении ряда интервенционных исследований, полученные с помощью радиохромных пленок. Измеренное значение максимальной поглощенной дозы в коже для 4 из 14 проанализированных процедур превысило пороговое значение поглощенной дозы для возникновения кожной эритемы в 2Гр. Самые большие значения максимальной поглощенной дозы в коже были получены для процедуры коронарной ангиопластики — 3,2 Гр и для процедуры эмболизации маточных артерий — 2,9 Гр.

Ключевые слова: интервенционная радиология, пленочная дозиметрия, детерминированные эффекты, поглощенная доза в коже.

Введение

Рентгенология играет важную роль в современной медицине. Однако чем информативнее рентгенологическое исследование, тем выше уровни облучения пациентов [1]. Интервенционные рентгенологические исследования (ИРЛИ) являются одними из наиболее «высокодозных» направлений в современной медицине [1, 2]. Практически исчезнувшие к 1920 г. сообщения о радиационных поражениях кожи, связанные с проведением диагностических рентгенологических процедур, с конца прошлого века вновь начали появляться в связи с проведением ИРЛИ, при этом дозы на кожу в некоторых из зафиксированных случаев были сопоставимы с дозами, получаемыми при лучевой терапии [2–5]. Вероятность возникновения радиационных поражений указывает на необходимость контроля облучения кожи пациентов с целью предотвращения у них детерминированных эффектов при проведении ИРЛИ [6]. В действующих методических указаниях «Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических

исследований» (МУ 2.6.1.2944-11) определение значения максимальной поглощенной дозы в коже (МПДК) пациентов при проведении диагностических и терапевтических ИРЛИ основано на использовании результатов измерений произведения дозы на площадь (ПДП) с помощью проходной камеры за время исследования. Данный способ удобен для повседневной клинической практики, однако для целей изучения и анализа распределения поглощенной дозы в коже пациентов необходимы прямые измерения на поверхности кожи, которые могут быть выполнены с помощью сетки термолюминисцентных дозиметров, рентгеночувствительных или радиохромных пленок, а также прямыми онлайн-измерениями [7, 8]. Из вышеперечисленных методов наиболее простыми в использовании являются радиохромные пленки [7–9]. В данной работе в связи с тем, что при ИРЛИ облучению могут подвергаться достаточно большие участки кожи пациентов, для большей наглядности были использованы радиохромные пленки Gafchromic XR-RV3 формата А3, разработанные непосредственно для измерения погло-

Сарычева Светлана Сергеевна

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: Svetlana2003@mail.ru

щенной дозы в коже при интервенционных исследованиях под рентгеновским контролем [10].

Цель исследования – измерение уровней облучения кожи пациентов, подвергающихся интервенционным рентгенологическим исследованиям с помощью специальных дозиметрических радиохромных пленок Gafchromic XR-RV3 для визуализации распределения облучения по поверхности кожи пациентов и изучения возможности превышения пороговых значений для возникновения детерминированных эффектов в коже.

Задачи исследования:

1. Апробация методики работы с радиохромными пленками, способов их оцифровки и программ для последующей работы с цифровым изображением.
2. Построение калибровочной кривой для получения количественных показателей уровней облучения.
3. Измерения распределения поглощенной дозы в коже пациента с помощью радиохромных пленок при проведении интервенционных исследований и оценка дозы в максимально облученных участках кожи.

Материалы и методы

Работа с радиохромными пленками

Пленка Gafchromic XR-RV3 создана специально для дозиметрии МПДК при ИРЛИ. Листы пленки имеют увеличенный размер: 14×17 дюймов (35×43 см) и чувствительны в диапазоне от 0,01 до 30 Гр в энергетическом диапазоне от 30 КэВ до 30 МэВ. Пленка имеет оранжевый цвет верхнего слоя, который при облучении темнеет [10]. Радиохромная пленка проявляется в режиме реального времени и не требует применения какой-либо проявочной машины и фотохимикатов, для оцифровки пленки может быть использован любой планшетный сканер. В данной работе применялся позволяющий работать с пленками формата А3 профессиональный сканер Microtek ScanMaker 9800XL.

Для оцифровки данного типа пленок разработана специальная программа «Film QA™ XR radiology dosimetry software», которая позволяет оценивать значение дозы в каждой точке [10]. Это платная программа с возможностью установки бесплатной версии со сроком использования 30 дней. После ознакомления с особенностями и принципами обработки изображений, полученных с помощью пленок Gafchromic XR-RV3 в данной программе, а также с альтернативными программами по обработке изображений [9, 11, 12] было решено использовать программу ImageJ [11], это общедоступная, написанная на языке Java программа для анализа и обработки изображений.

Калибровочная кривая

Для построения калибровочной кривой на 3 рентгеновских аппаратах в режиме рентгенографии были облучены маленькие куски пленки размером 10×10 см разными значениями дозы облучения: от 0,1 Гр до 1 Гр с шагом 0,1 Гр и от 1 Гр до 10 Гр с шагом 0,5 Гр. Контрольные значения поглощенной дозы измерялись с помощью ионизационной камеры компании Radcal Corporation (10X5) (США).

Также были изготовлены специальные «калибровочные полоски» с использованием свинцовых экраниру-

ющих пластин (рис. 1). В режиме рентгенографии полоски пленки были последовательно облучены разными уровнями дозы (от 0,1 Гр до 10 Гр). Участки пленки, которые не должны были подвергаться облучению, закрывались свинцовыми пластинами толщиной 1 мм. На всех облучаемых полосках оставался небольшой участок, который постоянно был закрыт свинцовой пластинкой в ходе облучения, – фоновое значение дозы, которое необходимо вычитать из показаний пленки.

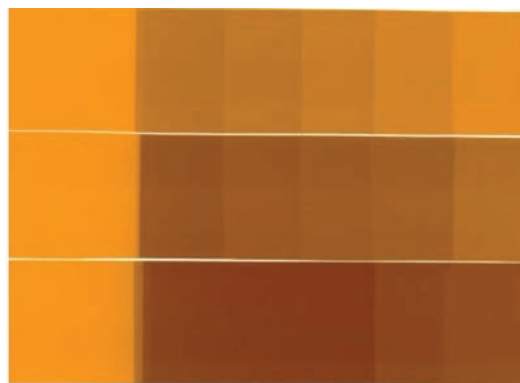


Рис. 1. Калибровочные полоски
[Fig. 1. The calibration strip]

Пленка была оцифрована на профессиональном сканере Microtek ScanMaker 9800XL, а полученные сканы обрабатывались с помощью программы ImageJ. Методика работы при построении калибровочной кривой была основана на опубликованных источниках [9, 12].

Измерения в рентген-операционных

Реальные измерения с помощью радиохромных пленок проводились в двух больницах города Санкт-Петербурга на аппаратах General Electric Innova 2000 (2001 г. выпуска) и Philips Integris V3000 (2006 г. выпуска).

Пленочные измерения проводились для ИРЛИ на сосудах сердца (9 процедур), сосудах головного мозга (3 процедуры) и для процедуры эмболизации (2 процедуры) для пациентов стандартной комплекции (70–75 кг). Всего было использовано 14 пленок Gafchromic XR-RV3.

Для проведения измерений поглощенной дозы в коже пленку располагали в непосредственной близости к коже пациента (через стерильную ткань) со стороны рентгеновской трубки. В связи с тем, что базовое положение рентгеновской трубки в современных ангиографических аппаратах – под столом, пленки располагали на столе под пациентом, в месте предполагаемой локализации облучения, оранжевой стороной вверх. Например, в случае коронарных исследований (область сердца) область расположения пленки – верхняя часть спины, а в случае исследований в брюшной полости – нижняя часть спины. Благодаря большому размеру пленки при правильном ее расположении практически любое ИРЛИ будет проводиться в её пределах.

В связи с особенностями облучения пациентов при исследованиях сосудов головного мозга (использование боковых проекций) пленки использовались, чтобы оценить дозу облучения кожи на затылочной части головы. Согласно литературным данным [8, 14, 15], именно в этой

проекции наиболее ожидаемы проявления возможных переоблучений, поэтому пленка располагалась под стерильной тканью, но над подушкой/валиком под затылок, для лучшего прилегания к телу пациента.

Результаты и обсуждение

Калибровочная кривая

На рисунке 2 представлена калибровочная кривая для радиоохромных пленок Gafchromic XR-RV3. Для ее построения использовались все полученные значения, а именно измерения на 3 аппаратах (Siemens Axiom Artis, Siemens Sirescop и Philips Integris).

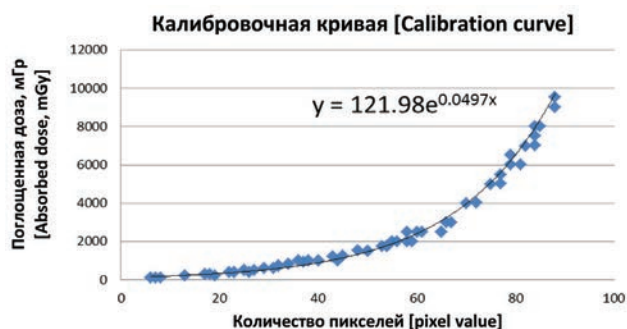


Рис. 2. Калибровочная кривая для радиоохромных пленок Gafchromic XR-RV3

[Fig. 2. Calibration curve for radiochromic films Gafchromic XR-RV3]

Применение 3 различных рентгеновских аппаратов и использование нескольких пленок, облучаемых одной и той же дозой, преследовало цель уйти от привязанности калибровочной кривой к конкретным условиям ее построения. Это связано с тем, что последующее ее использование необходимо при работе с пленками, которые будут облучаться на аппаратах, на которых калибровка пленки невозможна.

В данной работе не рассматривались вопросы погрешности измерения поглощенной дозы в коже с помощью радиоохромных пленок. Однако согласно масштабному мультинациональному исследованию, «общая неопределенность, связанная с использованием пленок XR-RV3 для определения дозы на кожу при интервенционных исследованиях, реально может быть оценена примерно в 20% ($k = 1$) и может быть уменьшена до 5% при аккуратной работе» [9]. В данной работе мы постарались учесть все рекомендации по снижению погрешности при проведении измерений и последующей обработке результатов [9, 12], в связи с чем мы можем рассчитывать, что итоговая погрешность измерений должна оказаться в пределах 20–30% допустимых для целей радиационной защиты [13].

Измерения в рентген-операционных

Наиболее сложными, с точки зрения распределения дозы в коже, что хорошо согласуется с литературными

данными [16–18], оказались коронарные исследования. Данный вид исследований характеризуется сравнительно небольшим размером поля облучения (11–17 см на приемнике) и обширной геометрией – использованием больших краниальных и каудальных наклонов трубки. На рисунке 3 приведен пример распределения дозы на поверхности кожи пациента при проведении диагностической коронарографии, на рисунке 4 – пример распределения кожной дозы при проведении коронарной ангиопластики. Работа на малых полях неразрывно связана с повышением исходящей мощности дозы аппарата [2], ввиду чего для данных процедур наиболее характерны возможные случаи переоблучения кожи вплоть до детерминированных эффектов. Как видно из рисунков 3 и 4, для данных видов исследований нехарактерно перекрытие полей для диагностики, однако характерно длительное позиционирование в зоне интереса в ходе терапевтического вмешательства. Средний размер площади поля на входе в тело пациента составляет 70–100 см², что и составляет примерную площадь участка возможного радиационного поражения кожи.

Случаи возможного переоблучения кожи возможны также при процедурах эмболизации, когда в течение очень длительного времени в режиме рентгеноскопии проводятся лечебные манипуляции. На рисунке 5 приведен результат пленочного измерения для процедуры эмболизации маточных артерий. Исследования в области брюшной полости/малого таза характеризуются большими полями облучения (30–40 см на приемнике) и редким использованием наклона трубки на небольшие углы.

Результаты МПДК, измеренные с помощью радиоохромных пленок, представлены в таблице. Там же даны итоговые значения ПДП за исследование.



Рис. 3. Пример распределения дозы на поверхности кожи пациента при проведении диагностической коронарографии (размер пленки 35×43 см)

[Fig. 3. An example of dose distribution on the patient's skin surface during diagnostic coronary angiography (film size 35×43 cm)]



Рис. 4. Примеры распределения дозы на поверхности кожи пациента при проведении коронарной ангиопластики со стентированием (размер пленки 35×43 см)

[Fig. 4. Examples of dose distribution on the patient's skin surface during coronary angioplasty with stent placement (film size 35×43 cm)]

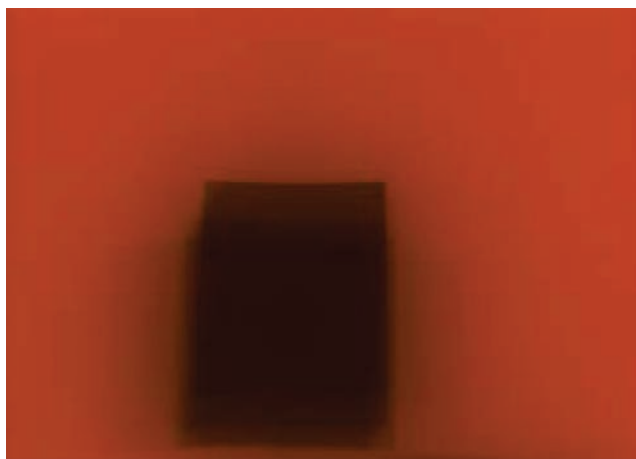


Рис. 5. Пример распределения дозы на поверхности кожи пациента при проведении процедуры эмболизации маточных артерий (размер пленки 35×43см)

[Fig. 5. An example of dose distribution on the patient's skin surface during uterine artery embolization (film size 35×43cm)]

Окончание таблицы

Вид исследования [Type of investigation]	ПДП, Гр×см ² [DAP, mGy×cm ²]	МПДК, мГр [MSD, mGy]
Коронарная ангиопластика со стентированием (лечебные манипуляции на сосудах сердца) [Coronary angioplasty with stent placement (treatment on the heart vessels)]	234 169 76 304 202	3242 1538 1086 2793 2178
Ангиография сосудов головного мозга (диагностика) [Angiography of cerebral vessels (diagnostic examination)]	71	346
Эмболизация сосудов головного мозга (терапевтическое исследование) [Cerebral embolization (therapeutic examination)]	272 157	1876 1141
Эмболизация маточных артерий (терапевтическое исследование) [Uterine artery embolization (therapeutic examination)]	870 273	2875 865

Измеренные значения ПДП и МПДК для ИРЛИ

Таблица

Measured values of DAP and MSD for IR procedures

Вид исследования [Type of investigation]	ПДП, Гр×см ² [DAP, mGy×cm ²]	МПДК, мГр [MSD, mGy]
Коронарная ангиография (диагностическое исследование сосудов сердца) [Coronary angiography (diagnostic examination of cardiac vessels)]	80 110 52 267	298 364 221 847

Как видно из таблицы, наибольшие поглощенные дозы облучения кожи характерны для терапевтических исследований ввиду их большей сложности и продолжительности. В случае коронарных исследований также существует разница в используемых размерах полей облучения между диагностическими (средний размер поля 16–17 см на приемнике) и терапевтическими (11–12 см) исследованиями.

Закключение

Исследования с помощью радиоохромных пленок позволяют получить наглядную картину распределения по-

глощенной дозы по поверхности кожи пациента и оценить значение МПДК. Такие исследования были выполнены для ряда основных интервенционных исследований, которые могут сопровождаться повышенным уровнем облучения кожи, вплоть до возможности превышения порогов возникновения детерминированных эффектов. В первую очередь это терапевтические исследования на сосудах сердца. Для данного типа исследований характерно использование малых полей, сопровождаемое использованием высокой мощности дозы, и даже при нашей небольшой выборке ряд процедур сопровождался МПДК выше 2Гр. Для процедур эмболизации в периферических областях, наоборот, характерно преимущественное использование прямой проекции и работа на больших полях, поэтому, как правило, возникает область перекрытия в центральной зоне. В сложных случаях большая длительность исследования может приводить к превышению дозового порога на кожу.

К сожалению, интервенционные исследования сопровождаются действительно большими уровнями облучения пациентов, вплоть до возможности возникновения детерминированных эффектов. Особенно опасно проведение сложных исследований для людей с избыточной массой тела, т.к. в этом случае количество излучения, необходимого для формирования изображения диагностического качества, возрастает.

Литература

1. UNSCEAR UN. Medical exposure to ionizing radiation. United National Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. A/AC.82/R. 669. Vienna: United Nations, 2008, 301 p.
2. ICRP. Publication 85. Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedures. Ann. ICRP. Vienna, Pergamon Press, 2000, vol. 30, № 2, 68 p.
3. Wagner L.K. [et al.] Severe skin reactions from interventional fluoroscopy: Case report and review of literature. Radiology 1999; 213: pp. 773–776.
4. Галстян, И.А. Местные лучевые поражения как осложнения медицинского облучения / И.А. Галстян, Н.М. Надежина // Мед. радиология и рад. безопасность. – 2012. – Т. 57 (5). – С. 31-36.
5. Амирасланов, Ю.А. Местные лучевые поражения при эндоваскулярных вмешательствах на коронарных артериях / Ю.А. Амирасланов [и др.] // Диагностическая и интервенционная радиология. – 2007. – Т. 2 (1). – С. 48-54.
6. Голиков, В.Ю. Оценка доз облучения пациентов при проведении интервенционных рентгенологических исследований / В.Ю. Голиков [и др.] // Радиационная гигиена. – СПб. – 2009. – Т. 2 (3). – С. 26-31.
7. Balter S. [et al.] Techniques to estimate radiation dose to skin during fluoroscopically guided procedures. J. Vasc. Interv. Radiol., 2001, Vol. 13, pp. 391-397.
8. Miller D.L. [et al.] Radiation doses in interventional radiology procedures: The RAD-IR study: Part II: Skin Dose. J. Vasc. Interv. Radiol., 2003, Vol. 14, pp. 977-990.
9. Farah J. [et al.] Characterization of XR-RV3 GafChromic® films in standard laboratory and in clinical conditions and means to evaluate uncertainties and reduce errors. Med. Phys., 2015 Jul, 42(7), pp. 4211-4226.
10. Официальный сайт производителя рентгеночувствительных пленок Gafchromic: <http://www.gafchromic.com/gafchromic-film/radiology-films/XR-RV3/index.asp> (дата обращения: 20.04.2019)
11. Конохов, А.Л. Руководство к использованию программного комплекса ImageJ для обработки изображений: Учебное методическое пособие / А.Л. Конохов. – Томск: кафедра ТУ, ТУСУР, 2012. – 105 с.
12. McCabe B.P., Speidel M.A. Calibration of GafChromic XR-RV3 radiochromic film for skin dose measurement using standardized x-ray spectra and a commercial flatbed scanner. Med. Phys., 2011 Apr, 38(4), pp. 1919-1930.
13. ICRU. Publication 74. Patient Dosimetry for X-rays used in medical imaging. Journal of the ICRU, 2005, Vol 5, No 2, 116 p.
14. Rampado O. and R. Ropolo. Entrances skin dose distribution maps for interventional neuroradiological procedures: a preliminary study. Radiation protection dosimetry, 2005, Vol. 117, No 1-3, pp. 256-259.
15. Neocleous A. [et al.] Dosimetry using Gafchromic XR-RV2 radiochromic films in interventional radiology. Radiation Protection Dosimetry, September 2011, Vol. 147, issue 1-2, pp. 78-82.
16. Morell R.-E. Dosimetry and optimisation in high dose fluoroscopic and fluorographic procedures. University of Nottingham, March 2006, 215 p.
17. Rehani M. M., Srimahachota S. Skin injuries in interventional procedures. Radiat. Prot. Dosimetry, 2011, 147 (1-2), pp. 8-12.
18. Struelens L. [et al.] Skin dose measurements on patients for diagnostic and interventional neuroradiology: a multicentre study. Radiation protection dosimetry, 2005, Vol. 114, No. 1-3, pp. 143-146.

Поступила: 25.04.2019 г.

Сарычева Светлана Сергеевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник 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: Svetlana2003@mail.ru

Для цитирования: Сарычева С.С. Измерение поглощенной дозы в коже пациентов, подвергающихся интервенционным исследованиям, с помощью радиохромных пленок Gafchromic XR-RV3 // Радиационная гигиена. – 2019. – Т. 12, № 4. – С. 89–95. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-89-95

Patients skin dose measurements during interventional radiological examinations using Gafchromic XR-RV3 FILM

Svetlana S. Sarycheva

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

This work is devoted to the assessment of the absorbed dose in the skin of patients undergoing interventional radiological examinations. There is a probability of deterministic effects in the skin of patients due to high doses of radiation during this type of medical examinations. The aim of this work was to conduct direct measurements of the absorbed dose in the skin of patients undergoing interventional radiological procedures using special dosimetric radiochromic films Gafchromic XR-RV3 to visualize the distribution of radiation over the patient's skin surface and to study the possibility of exceeding the threshold values for the deterministic effects in the skin. The paper discusses the features of measurements with Gafchromic XR-RV3 films. The method of film digitization on conventional flatbed scanner and image processing with the ImageJ program was tested. The obtained calibration curve for this type of film was presented. The skin dose distributions for several interventional studies obtained with radiochromic films were presented. The measured value of the maximum absorbed dose in the skin for four of the fourteen analyzed procedures exceeded the threshold value of the absorbed dose for the occurrence of skin erythema in 2 Gy. The highest values of the maximum absorbed dose in the skin were obtained for the coronary angioplasty – 3.2 Gy and for the procedure of embolization of the uterine arteries – 2.9 Gy.

Key words: *Interventional radiology, film dosimetry, deterministic effects, absorbed dose in the skin.*

References

1. UNSCEAR UN. Medical exposure to ionizing radiation. United National Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. A/AC.82/R. 669. Vienna: United Nations, 2008, 301 p.
2. ICRP. Publication 85. Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedures. Ann. ICRP. Vienna, Pergamon Press, 2000, vol. 30, № 2, 68 p.
3. Wagner L.K. [et al.] Severe skin reactions from interventional fluoroscopy: Case report and review of literature. Radiology 1999; 213: pp. 773–776.
4. Galstyan I.A., Nadezhina N.M. Local Radiation Injuries as Complications of Medical Radiation Exposure. Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety, 2012, 57 (5), pp. 31–36. (in Russian)
5. Amiraslanov Y.A. Local radiation injuries gained due to endovascular interventions of coronary arteries / Y.A. Amiraslanov [et al.] // Diagnostic and Interventional Radiology, 2007, 2 (1), pp. 48–54. (in Russian)
6. Golikov V.Yu. Estimation of patient exposure under interventional radiological examinations / V.Yu. Golikov [et al.] // Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene, SPb. – 2009. vol. 2, № 3, pp. 26–31. (in Russian)
7. Balter S. [et al.] Techniques to estimate radiation dose to skin during fluoroscopically guided procedures. J. Vasc. Interv. Radiol., 2001, Vol. 13, pp. 391–397.
8. Miller D.L. [et al.] Radiation doses in interventional radiology procedures: The RAD-IR study: Part II: Skin Dose. J. Vasc. Interv. Radiol., 2003, Vol. 14, pp. 977–990.
9. Farah J. [et al.] Characterization of XR-RV3 GafChromic® films in standard laboratory and in clinical conditions and means to evaluate uncertainties and reduce errors. Med. Phys., 2015 Jul, 42(7), pp. 4211–4226.
10. Official site of the manufacturer of X-ray sensitive films Gafchromic. – Available on: <http://www.gafchromic.com/gafchromic-film/radiology-films/XR-RV3/index.asp> (Accessed: 20.04.2019) (In Russian)
11. Konyukhov A.L. Guidelines for using of ImageJ software for image processing: Training guide. Tomsk: department TU, TUSUR, 2012, 105 p. (in Russian)
12. McCabe B.P., Speidel M.A. Calibration of GafChromic XR-RV3 radiochromic film for skin dose measurement using standardized x-ray spectra and a commercial flatbed scanner. Med. Phys., 2011 Apr, 38(4), pp. 1919–1930.
13. ICRU. Publication 74. Patient Dosimetry for X-rays used in medical imaging. Journal of the ICRU, 2005, Vol 5, No 2, 116 p.
14. Rampado O. and R. Ropolo. Entrances skin dose distribution maps for interventional neuroradiological procedures: a preliminary study. Radiation protection dosimetry, 2005, Vol. 117, No 1-3, pp. 256–259.
15. Neocleous A. [et al.] Dosimetry using Gafchromic XR-RV2 radiochromic films in interventional radiology. Radiation Protection Dosimetry, September 2011, Vol. 147, issue 1-2, pp. 78–82.
16. Morell R.-E. Dosimetry and optimisation in high dose fluoroscopic and fluorographic procedures. University of Nottingham, March 2006, 215 p.
17. Rehani M. M., Srimahachota S. Skin injuries in interventional procedures. Radiat. Prot. Dosimetry, 2011, 147 (1-2), pp. 8–12.
18. Struelens L. [et al.] Skin dose measurements on patients for diagnostic and interventional neuroradiology: a multicentre study. Radiation protection dosimetry, 2005, Vol. 114, No. 1-3, pp. 143–146.

Received: April 25, 2019

Svetlana S. Sarycheva – Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev
Address for correspondence: Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: Svetlana2003@mail.ru

For correspondence: Svetlana S. Sarycheva – candidate of biological sciences, Senior Scientific Researcher 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 (Mira Str., 8, St. Petersburg, 197101, Russia; E-mail: Svetlana2003@mail.ru).

For citation: Sarycheva S.S. Patients skin dose measurements during interventional radiological examinations using Gafchromic XR-RV3 FILM. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene, 2019, Vol.12, No 4, pp. 89-95. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-89-95.

Динамика доз облучения населения Российской Федерации за период с 2003 по 2018 г.

А.Н. Барковский, А.А. Братилова, Т.А. Кормановская, Руслан Р. Ахматдинов, Рустам Р. Ахматдинов

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 прошедшие годы радиационно-гигиеническая паспортизация и Единая государственная система контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан стали надежным источником достоверной и полной информации о состоянии радиационной безопасности в Российской Федерации и ее субъектах и составили основу Российской системы информационного обеспечения радиационной безопасности. На основе анализа этой информации ежегодно выпускается информационный сборник «Дозы облучения населения Российской Федерации». Настоящая статья посвящена обобщению и анализу информации, содержащейся в этих сборниках, с целью изучения динамики доз облучения населения Российской Федерации от основных источников ионизирующего излучения за период с 2003 по 2018 г. и определения тенденций ее дальнейшего развития. Показано, что средние годовые дозы техногенного облучения персонала за этот период варьировали в пределах от 1,0 до 1,4 мЗв/год для персонала группы А и от 0,65 до 0,80 мЗв/год для персонала группы Б. Количество превышений среднегодового предела эффективной дозы для персонала группы А колебалось от 5 до 52 в год, а группы Б — от 0 до 22 в год. За весь рассматриваемый период зарегистрировано только 3 случая превышения годовой индивидуальной дозы 50 мЗв у персонала группы А и 4 случая превышения годовой индивидуальной дозы 12,5 мЗв для персонала группы Б. Средняя доза медицинского облучения с 2006 по 2013 г. уменьшалась с 0,56 мЗв на процедуру до 0,26 мЗв на процедуру, а затем начала медленно расти, достигнув в 2018 г. 0,29 мЗв на процедуру. Аналогичная картина имела место и для доз медицинского облучения в среднем на одного жителя: с 2003 по 2013 г. уменьшение с 0,86 мЗв на жителя до 0,45 мЗв на жителя с последующим ростом до 0,56 мЗв на жителя. Отмечен бурный рост количества компьютерных томографий с 1,3 млн в 2003 г. до 11,7 млн в 2018 г. Вклад компьютерной томографии в дозу медицинского облучения возрос с 5,7% до 54,0%, т.е. почти в 10 раз. Отмечено, что доля измеренных доз медицинского облучения пациентов составила 73%, что явно недостаточно. Средние годовые эффективные дозы природного облучения населения субъектов Российской Федерации за рассматриваемый период варьируют от 1,6 до 15,1 мЗв/год при среднем значении для России в целом от 3,11 мЗв/год до 3,79 мЗв/год. Наибольшие средние годовые дозы, превышающие 5,0 мЗв/год, за все годы получало население Республики Алтай, Еврейской автономной области, Ставропольского и Забайкальского краев, Республики Тыва и Иркутской области. Во всех случаях около 60% дозы природного облучения обусловлены радоном. Суммарные средние дозы, превышающие 10 мЗв/год, в отдельные годы имели место для 2 субъектов Российской Федерации (Республика Алтай и Еврейская АО). Для 10 субъектов Российской Федерации (Республики Бурятия, Алтай, Тыва, Ставропольский и Забайкальский края, Иркутская и Читинская области, Еврейская автономная область, Агинско-Бурятский и Усть-Ордынский Бурятский автономные округа) они превышают 5 мЗв/год за весь рассматриваемый период.

Ключевые слова: годовая эффективная доза, природное облучение, техногенное облучение, медицинское облучение, динамика доз населения, контроль доз.

Введение

В соответствии с требованиями статьи 13 Федерального закона «О радиационной безопасности населения» от 9 января 1996 г. № 3-ФЗ в Российской Федерации с 1998 г. проводится радиационно-гигиеническая паспортизация, а в соответствии со статьей 18 того же закона с 2000 г. в Российской Федерации начала

функционировать Единая государственная система контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан (ЕСКИД). За прошедшие годы радиационно-гигиеническая паспортизация и ЕСКИД стали надежным источником достоверной и полной информации о состоянии радиационной безопасности в Российской Федерации и ее субъектах и составили основу Российской си-

Барковский Анатолий Николаевич

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

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

стемы информационного обеспечения радиационной безопасности.

На основе анализа и обобщения информации, получаемой в рамках радиационно-гигиенической паспортизации и ЕСКИД, специалистами ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева в 2001 г. был выпущен первый справочник «Дозы ионизирующего излучения у населения Российской Федерации в 1999 году» [1]. С 2004 г. он начал выпускаться ежегодно [2–6]. С 2008 г. выпускается информационный сборник, содержащий дозы облучения населения Российской Федерации [7–18].

В данных работах достаточно подробно представлены все основные компоненты годовой эффективной дозы облучения населения Российской Федерации за эти годы. Представляет интерес анализ динамики доз облучения населения, как по субъектам Российской Федерации, так и в целом по России. При этом важно рассмотреть и динамику основных компонентов доз облучения и определить тенденции их изменения в будущем.

Цель исследования – изучение динамики доз облучения населения Российской Федерации за прошедшие 16 лет на основе анализа информации, полученной в результате функционирования в Российской Федерации системы радиационно-гигиенической паспортизации и ЕСКИД.

Динамика доз техногенного производственного облучения персонала в условиях нормальной эксплуатации радиационных объектов

Общее количество радиационных объектов на территории Российской Федерации, сведения о которых собирались в рамках радиационно-гигиенической паспортизации и ЕСКИД, в период с 2003 по 2018 г. постоянно возрастало с 15 729 в 2003 г. до 21 696 в 2018 г. Возрастала и численность персонала группы А, работающего на данных объектах, – со 159 774 чел. в 2003 г. до 227 198 чел. в 2018 г.

Средние годовые индивидуальные дозы персонала группы А за этот период колебались в пределах 1,0–

1,4 мЗв/год, а персонала группы Б – в пределах 0,65–0,8 мЗв (рис. 1).

При этом количество превышений среднегодового предела эффективной дозы для персонала группы А колебалось от 5 до 52 в год, а персонала группы Б – от 0 до 22 в год (рис. 2). В 3 случаях в 2012 г. был превышен предел дозы для персонала группы А, а в 2003, 2004, 2006 и 2017 гг. зарегистрировано по 1 случаю превышения предела дозы для персонала группы Б. Обращает на себя внимание тот факт, что в рассматриваемый период количество превышений среднегодового предела эффективной дозы для персонала группы Б сравнимо, а в ряде случаев и больше количества таких случаев для персонала группы А.

Это связано с тем, что для заметной части персонала группы Б, для которой существует вероятность превышения предела дозы, проводится индивидуальный дозиметрический контроль. В частности, это имеет место для членов хирургических бригад, проводящих операции под рентгеновским контролем.

Представляет интерес постоянный рост численности персонала группы А, совмещающего работу на нескольких радиационных объектах. Численность данной категории персонала возросла со 185 чел. в 2003 г. до 9913 чел. в 2018 г., т.е. более чем в 40 раз (рис. 3).

На рисунке 4 представлены распределения средних годовых эффективных доз персонала группы А и группы Б по субъектам Российской Федерации за 16 лет с 2003 по 2018 г. Как видно из представленных результатов, указанные распределения для персонала группы А и группы Б различаются не слишком сильно. При разнице в пределе дозы в 4 раза средние значения различаются всего в 1,5 раза (1,08 и 0,73 мЗв/год соответственно).

Это является следствием преимущественного использования для оценки доз персонала группы Б расчетного метода на основе измеренных значений мощности дозы на рабочих местах, включающих и природную составляющую.

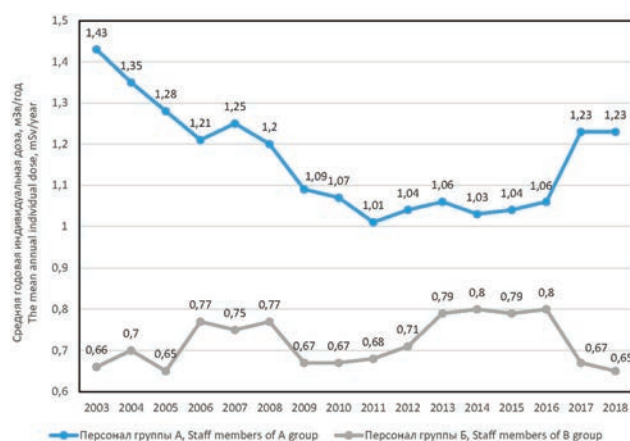


Рис. 1. Динамика средних годовых индивидуальных доз облучения

[Fig. 1. Trends of the mean annual individual doses for staff members of A and B groups]

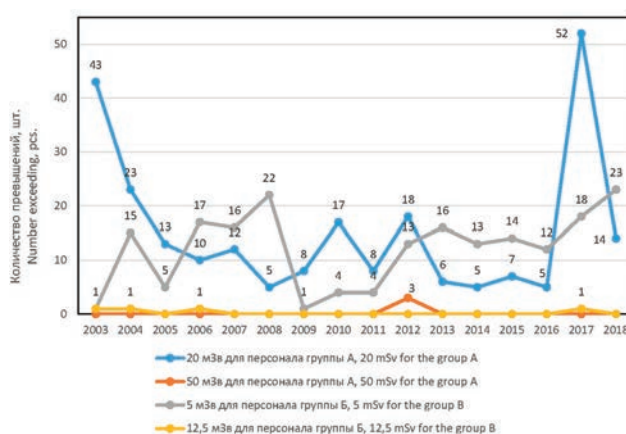


Рис. 2. Число лиц из персонала с годовой индивидуальной дозой производственного облучения более 20/50 мЗв/год для персонала группы А и более 5/12,5 мЗв/год для персонала группы Б

[Fig. 2. Number of staff members with annual individual dose from occupational exposure exceeding 20/50 mSv for group A and 5/12,5 for group B]

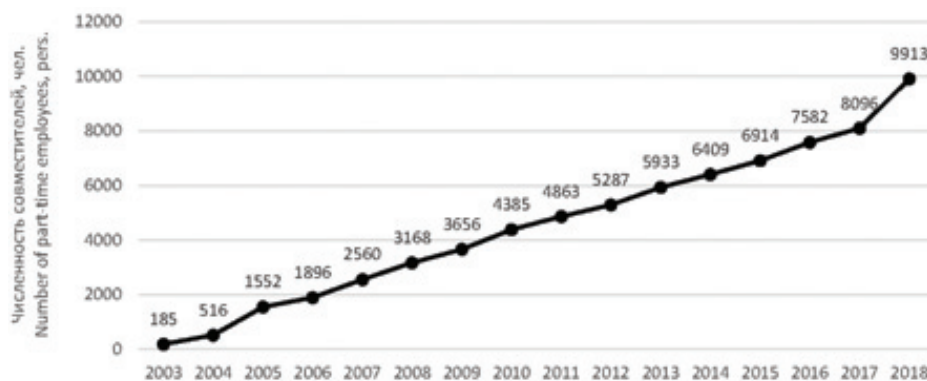
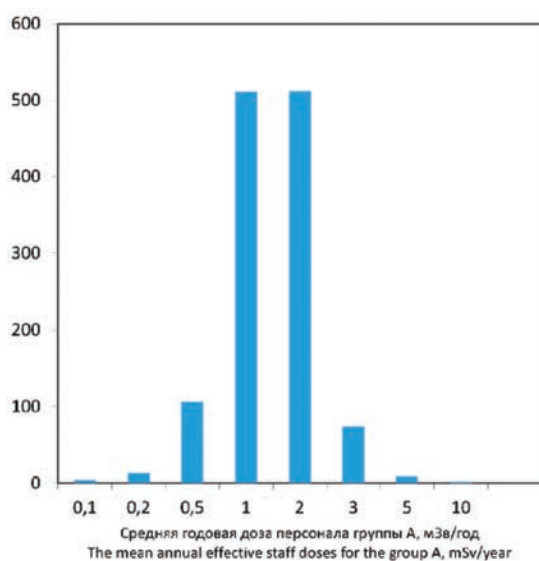
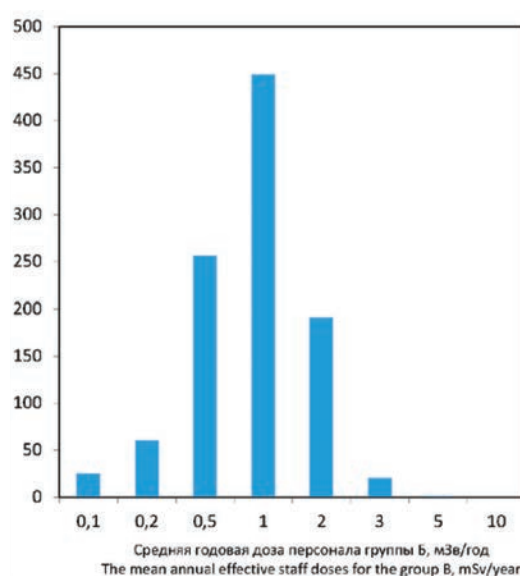


Рис. 3. Динамика числа совместителей
[Fig. 3. Trends in the number of part-time employees]



а



б

Рис. 4. Распределения средних годовых эффективных доз персонала группы А (а) и персонала группы Б (б) по субъектам Российской Федерации за период с 2003 по 2018 г.
[Fig. 4. Distributions of mean annual effective staff doses for the group A (a) and group B (б) in subjects of the Russian Federation in 2003–2018]

В приложении 1 представлены данные по средним по субъектам Российской Федерации годовым эффективным дозам облучения персонала группы А, а в приложении 2 – персонала группы Б. Как видно из представленных данных, средние по субъектам Российской Федерации годовые эффективные дозы облучения персонала группы А за эти 16 лет не превышали 5,1 мЗв/год, средние по субъектам Российской Федерации дозы облучения персонала группы Б – 3,8 мЗв/год.

Динамика доз медицинского облучения населения Российской Федерации

Общее количество рентгенорадиологических процедур, проводимых в Российской Федерации за год, возросло со 176 млн в 2003 г. до 279 млн в 2018 г. (рис. 5). При этом средняя доза за процедуру с 2006 по 2013 г. уменьшалась с 0,56 мЗв на процедуру до 0,26 мЗв на процедуру

ру, а затем начала медленно расти, достигнув в 2018 г. 0,29 мЗв на процедуру (рис. 6). Аналогичная картина имела место и для доз медицинского облучения в среднем на одного жителя: с 2003 по 2013 г. уменьшение с 0,86 мЗв на жителя до 0,45 мЗв на жителя с последующим ростом до 0,56 мЗв на жителя (рис. 6).

На рисунке 7 представлена динамика вклада в дозу медицинского облучения различных видов исследований, а на рисунке 8 – годового количества рентгенорадиологических процедур по видам исследований. Как видно из представленных результатов, за этот период наблюдался медленный рост количества рентгенографических и флюорографических исследований, снижение количества рентгеноскопий и бурный рост количества компьютерных томографий. Количество компьютерных томографий возросло с 1,3 млн в 2003 г. до 11,7 млн в 2018 г., т.е. в 9 раз. При этом вклад компьютерной томографии в дозу меди-

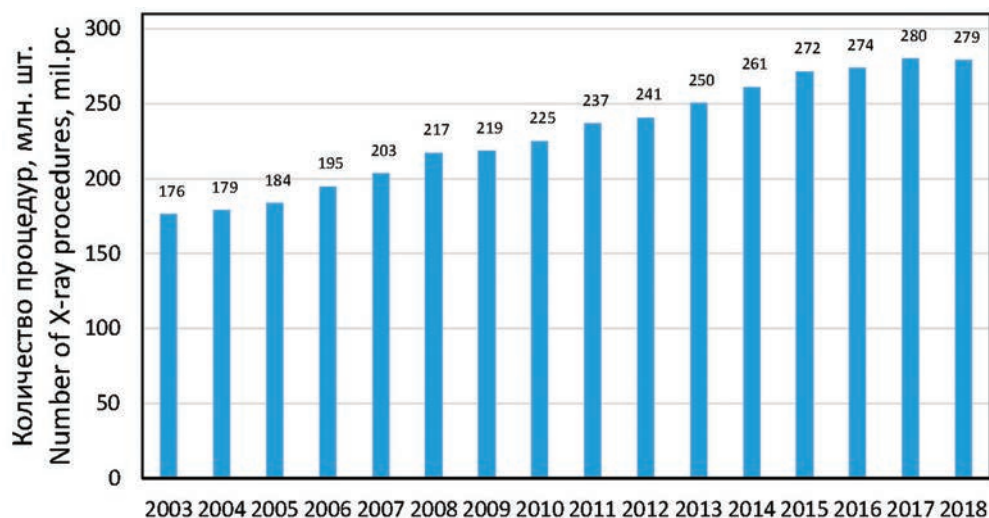


Рис. 5. Количество рентгенорадиологических процедур за год
[Fig. 5. Number of X-ray procedures per year]

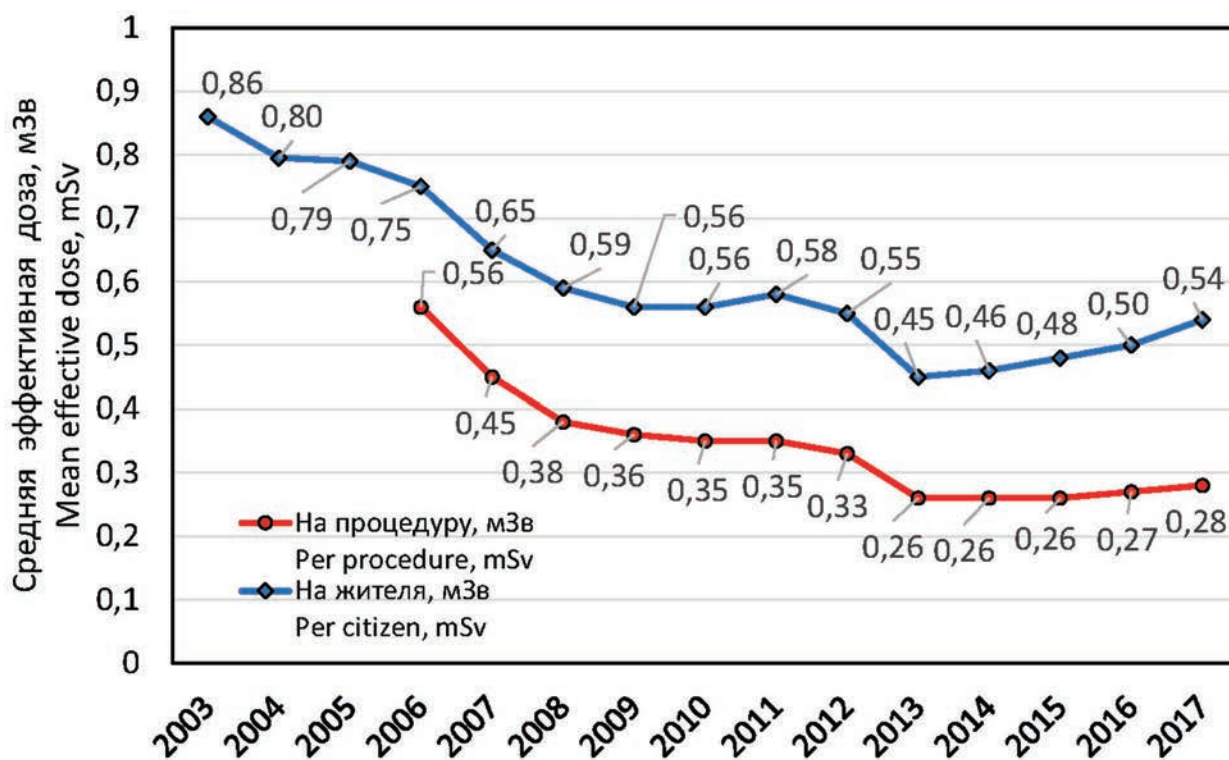


Рис. 6. Средние годовые эффективные дозы медицинского облучения в расчете на одного жителя и за одну процедуру
[Fig. 6. Mean annual effective doses from medical exposure per procedure and per citizen]

цинского облучения возрос с 5,7% до 54,0%, т.е в почти в 10 раз. Эта тенденция отчетливо прослеживается и для большинства субъектов Российской Федерации. Влад компьютерной томографии в дозу медицинского облучения для различных субъектов Российской Федерации в 2018 г. варьировал от 27% до 74%. Для 37 субъектов Российской Федерации данная величина менее 50%, для 6 из них – менее 30%.

В приложении 3 представлены данные для субъектов Российской Федерации по динамике средних доз медицинского облучения в расчете на одну рентгенорадиологическую процедуру. Как видно из представленных данных, имеется заметный разброс этого показателя по субъектам Российской Федерации, но с тенденцией к постепенному снижению, хотя в последние 2–3 года наметился рост данного показателя. Это связано со значи-

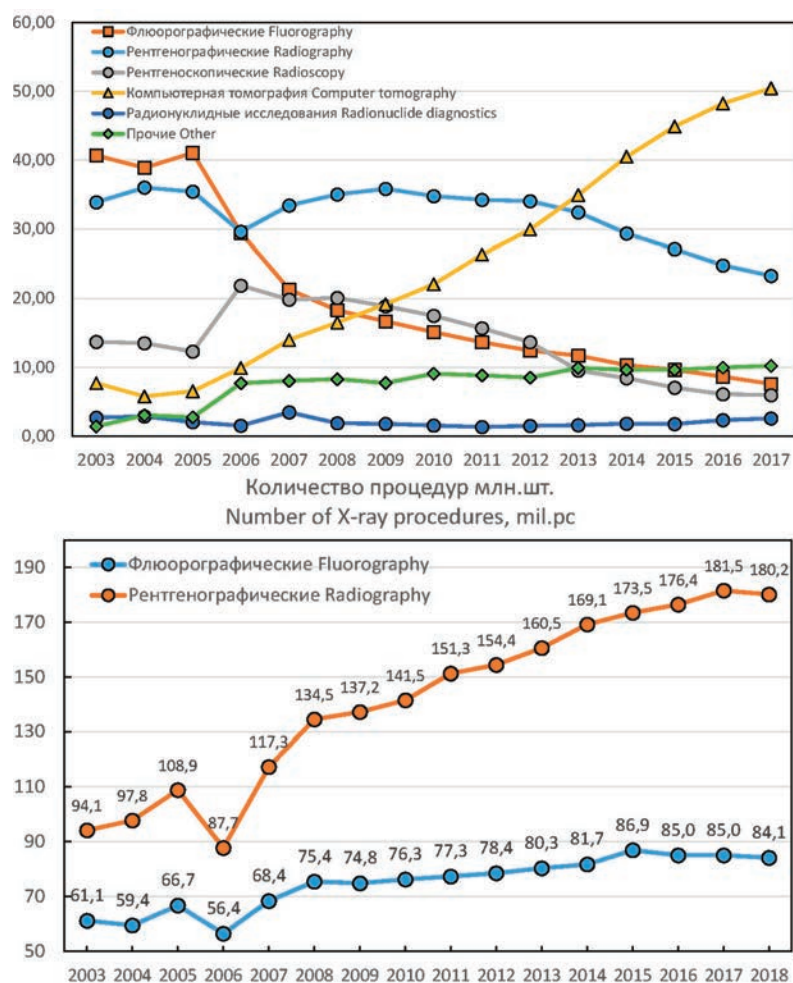


Рис. 7. Вклад в дозу медицинского облучения различных видов исследований, в %

[Fig 7. Contribution of different imaging modalities to the collective dose from medical exposure, %]

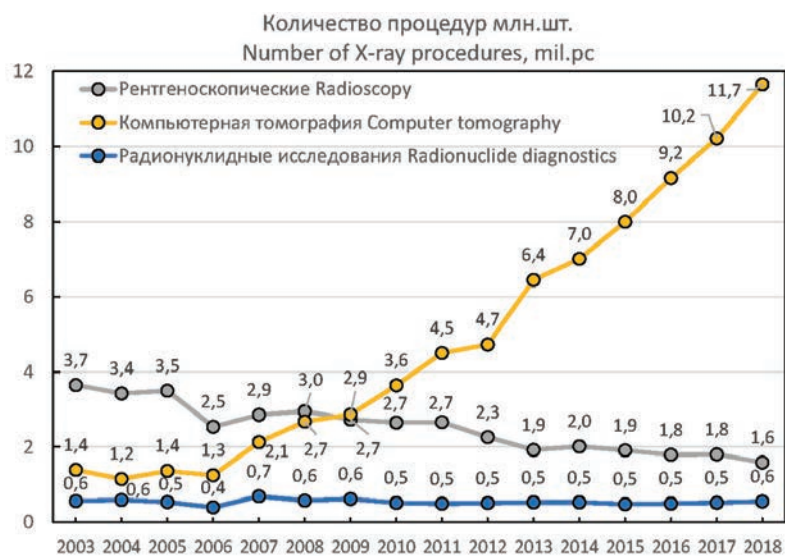


Рис. 8. Динамика годового количества рентгенорадиологических процедур по видам исследований

[Fig 8. Trends of the annual number of X-ray examination by imaging modalities]

тельным ростом количества компьютерных томографий. Средние по субъектам Российской Федерации дозы за процедуру за последние 10 лет варьировали от 0,1 мЗв до 0,69 мЗв. При этом хотя бы за один год этого периода средние дозы на процедуру превышали 0,4 мЗв для 39, 0,5 мЗв для 8 и 0,6 мЗв для 3 субъектов Российской Федерации. Наибольшие значения средних доз медицинского облучения в расчете на одну процедуру имеют место в Республиках Башкортостан и Карелия, Краснодарском крае, Калининградской и Ульяновской областях и в Москве.

На рисунке 9 приведена динамика количества рентгенодиагностических процедур, дозы от которых оценивались инструментальными и расчетными методами. Как видно из представленных результатов, к 2015 г. доля измеренных доз достигла 73% и в дальнейшем практически не изменялась. Это явно недостаточно, т.е. в настоящее время в Российской Федерации 23% рентгенодиагностических исследований проводятся с нарушением требова-

ний федерального закона «О радиационной безопасности населения».

Динамика доз облучения населения Российской Федерации за счет природных источников ионизирующего излучения

Средние годовые эффективные дозы природного облучения населения субъектов Российской Федерации за период с 2003 по 2018 г., оцененные по результатам радиационно-гигиенической паспортизации, варьировали от 1,6 до 15,1 мЗв/год при среднем значении для Российской Федерации в целом от 3,11 мЗв/год до 3,79 мЗв/год.

Наибольшие средние дозы, превышающие 5,0 мЗв/год за период с 2003 по 2018 г., получало население Республики Алтай, Еврейской автономной области, Ставропольского и Забайкальского краев, Республики Тыва и Иркутской области.

В таблице приведена динамика структуры доз природного облучения в среднем по Российской Федерации.

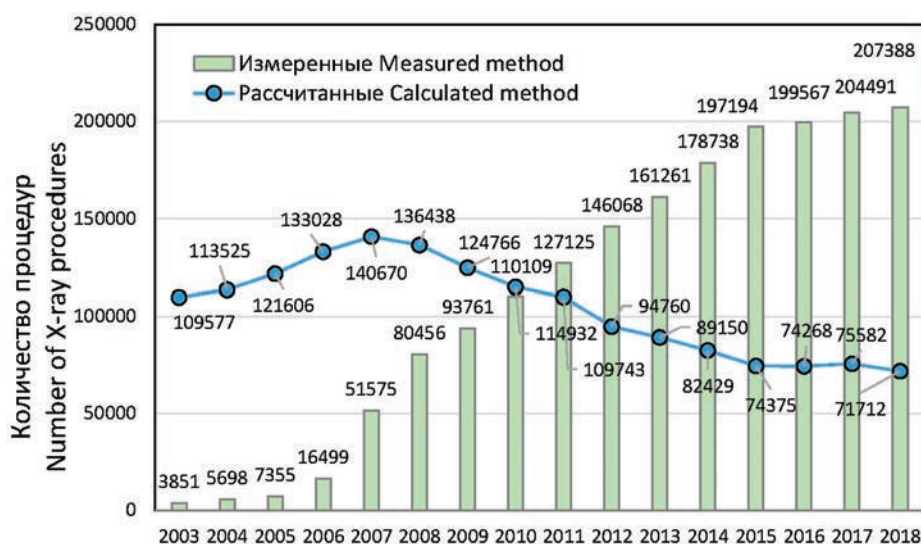


Рис. 9. Динамика количества рентгенодиагностических процедур, дозы от которых оценивались инструментальными (измеренные) и расчетными (рассчитанные) методами
[Fig. 9. Trends of the number of X-ray procedures with the doses assessed by measured and calculated methods]

Средние годовые эффективные дозы облучения населения Российской Федерации основными природными ИИИ за период с 2003 по 2018 г.

Таблица

[Table

Mean annual effective doses of the population of the Russian Federation from the main natural sources of ionizing exposure in 2003–2018]

Год [Year]	Средняя годовая эффективная доза, мЗв/год [Mean annual effective dose, mSv/year]						Суммарная доза [Total dose]
	K-40	Космическая компонента [Cosmic component]	Внешнее терригенное облучение [External exposure]	Изотопы радо- на в воздухе [Radon daugh- ters in the air]	Пищевые продукты + питьевая вода [Food products+drinking water]	Атмосферный воздух [Atmospheric air]	
2003	0,17	0,40	1,32	2,17	0,12	0,006	3,79
2004	0,17	0,40	1,27	2,06	0,19	0,006	3,70
2005	0,17	0,40	1,31	1,99	0,15	0,006	3,63

Год [Year]	Средняя годовая эффективная доза, мЗв/год [Mean annual effective dose, mSv/year]						Суммарная доза [Total dose]
	K-40	Космическая компонента [Cosmic component]	Внешнее терригенное облучение [External exposure]	Изотопы радо- на в воздухе [Radon daugh- ters in the air]	Пищевые продукты + питьевая вода [Food products+drinking water]	Атмосферный воздух [Atmospheric air]	
2006	0,17	0,40	1,02	2,12	0,15	0,006	3,46
2007	0,17	0,40	1,14	1,87	0,19	0,006	3,37
2008	0,17	0,40	1,08	1,83	0,21	0,006	3,29
2009	0,17	0,40	1,09	1,77	0,21	0,006	3,25
2010	0,17	0,40	1,08	1,61	0,24	0,006	3,11
2011	0,17	0,40	1,11	1,86	0,21	0,006	3,35
2012	0,17	0,40	1,08	1,89	0,20	0,006	3,35
2013	0,17	0,40	1,10	2,03	0,16	0,006	3,47
2014	0,17	0,40	1,09	2,05	0,17	0,006	3,48
2015	0,17	0,40	1,08	2,02	0,16	0,006	3,44
2016	0,17	0,40	0,67	2,05	0,17	0,006	3,47
2017	0,17	0,40	0,69	1,97	0,17	0,006	3,41
2018	0,17	0,40	0,68	2,05	0,17	0,006	3,47

Как видно из представленных результатов, оценка средней годовой эффективной дозы природного облучения за этот период колебалась от 3,79 до 3,11 мЗв/год при среднем значении за весь период 3,2 мЗв/год. За последние 5 лет оценка средней дозы стабилизировалась и составляет $3,45 \pm 0,03$ мЗв/год.

Основной вклад (от 1,61 до 2,17 мЗв/год) в дозу природного облучения вносит облучение за счет ингаляции изотопов радона и их дочерних продуктов распада.

Из представленных данных видно, что изменения соотношения компонентов дозы природного облучения в рассматриваемом периоде незначительны.

Динамика средних годовых эффективных доз природного облучения населения субъектов Российской Федерации представлена в приложении 4.

Динамика годовых эффективных доз облучения населения субъектов Российской Федерации за счет всех основных источников ионизирующего излучения

В приложении 5 представлены средние годовые эффективные дозы населения субъектов Российской Федерации за счет всех основных источников ионизирующего излучения за период с 2003 по 2018 г. Как видно из представленных результатов, наибольшие суммарные дозы имеют место для тех субъектов Российской Федерации, у которых наибольшие значения доз природного облучения.

Средние дозы, превышающие 10 мЗв/год, в отдельные годы имели место для 2 субъектов Российской Федерации (Республика Алтай и Еврейская автономная область). Средние дозы более 5 мЗв/год в отдельные годы имели 36 субъектов Российской Федерации. Для 10 субъектов Российской Федерации они превышают 5 мЗв/год за весь рассматриваемый период (Республики Бурятия, Алтай, Тыва, Ставропольский и Забайкальский

край, Иркутская и Читинская области, Еврейская автономная область, Агинско-Бурятский и Усть-Ордынский Бурятский автономные округа).

Заключение

Анализ представленных данных о динамике доз облучения населения Российской Федерации за счет всех основных источников ионизирующего излучения показывает, что облучение населения Российской Федерации за последние 16 лет достаточно стабильно. Вариации средних годовых эффективных доз облучения населения России за этот период не превышают 5%, а за последние 10 лет – 2%. Средние годовые эффективные дозы населения субъектов Российской Федерации имеют больший разброс за этот период. Для 16 субъектов Российской Федерации он превышает 30%. В основном, это объясняется отсутствием данных по ЭРОА радона в отдельные годы, что приводило к значительно заниженным оценкам доз облучения за эти годы. Средние годовые эффективные дозы, превышающие 10 мЗв/год, в отдельные годы имели место только для 2 субъектов Российской Федерации: Республика Алтай и Еврейская автономная область. Средние дозы более 5 мЗв/год в отдельные годы имели 36 субъектов Российской Федерации. Для 10 субъектов Российской Федерации они превышают 5 мЗв/год за весь рассматриваемый период (Республики Бурятия, Алтай, Тыва, Ставропольский и Забайкальский край, Иркутская и Читинская области, Еврейская автономная область, Агинско-Бурятский и Усть-Ордынский Бурятский автономные округа).

Средние годовые дозы облучения персонала группы А радиационных объектов Российской Федерации за период с 2003 по 2018 г. варьировали от 1,01 до 1,43 мЗв/год, а персонала группы Б – от 0,65 до 0,80 мЗв. Максимальные среднегодовые дозы персонала группы А в отдельные годы

зарегистрированы в Республике Дагестан (5,1 мЗв/год), в Республике Алтай (4,5 мЗв/год) и в Липецкой области (3,5 мЗв/год). При этом количество превышений среднегодового предела дозы для персонала группы А колебалось от 5 до 52 в год, а для персонала группы Б – от 0 до 22 в год. В 3 случаях в 2012 г. был превышен предел дозы для персонала группы А, а в 2003, 2004, 2006 и 2017 гг. зарегистрировано по 1 случаю превышения предела дозы для персонала группы Б. Т.е. ситуацию с облучением персонала можно признать удовлетворительной.

Анализ динамики доз облучения пациентов при проведении диагностических процедур с использованием источников ионизирующего излучения в медицинских учреждениях Российской Федерации показывает, что наблюдается постоянный рост количества проводимых за год рентгено-радиологических диагностических процедур, а за последние несколько лет – и рост средней годовой эффективной дозы медицинского облучения в расчете на одного жителя и в расчете на одну диагностическую процедуру. Наиболее интенсивно возрастают количество проводимых за год компьютерных томографий и годовая коллективная доза облучения пациентов за счет данного вида диагностики. Вклад компьютерной томографии в дозу медицинского облучения населения Российской Федерации за рассматриваемый период увеличился почти в 10 раз и в настоящее время составляет 54%. Дозы медицинского облучения в Российской Федерации в будущем неизбежно будут возрастать, приближаясь к природному облучению. Об этом свидетельствует опыт развитых стран. Поэтому эффективному контролю доз облучения пациентов следует уделять самое серьезное внимание, чтобы не допустить необоснованного роста данного компонента дозы облучения населения.

Средние годовые эффективные дозы природного облучения населения Российской Федерации, в целом, относительно стабильны (варьируют от 3,11 мЗв/год до 3,79 мЗв/год), но наблюдается существенное различие средних доз по субъектам Российской Федерации (от 1,6 до 15,1 мЗв/год в отдельные годы). Практически во всех случаях почти 60% этой дозы определяется ингаляцией изотопов радона и их дочерних продуктов распада. Ситуация с природным облучением населения ряда регионов Российской Федерации неудовлетворительная. За эти годы выявлено значительное количество населенных пунктов с аномально высокими дозами облучения населения, значительно превышающими 10 мЗв/год. Необходимы серьезные меры по решению данной проблемы.

Литература

1. Рамзаев, П.В. Дозы ионизирующего излучения у населения Российской Федерации в 1999 году: справочник / П.В. Рамзаев [и др.]. – СПб, 2001. – 29 с.
2. Барковский, А.Н. Дозы ионизирующего излучения у населения Российской Федерации в 2002 году: справочник / А.Н. Барковский [и др.]. – СПб, 2004. – 61 с.
3. Барковский, А.Н. Дозы ионизирующего излучения у населения Российской Федерации в 2003 году: справочник / А.Н. Барковский [и др.]. – СПб, 2004. – 59 с.
4. Барковский, А.Н. Дозы ионизирующего излучения у населения Российской Федерации в 2004 году: справочник / А.Н. Барковский, [и др.]. – СПб, 2005. – 61 с.
5. Барковский, А.Н. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2005 году: справочник / А.Н. Барковский [и др.]. – СПб, 2006. – 39 с.
6. Барковский, А.Н. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2006 году: справочник / А.Н. Барковский [и др.]. – СПб, 2007. – 61 с.
7. Барковский, А.Н. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2007 году: информ. сборник / А.Н. Барковский [и др.]. – СПб, 2008. – 66 с.
8. Барковский, А.Н. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2008 году: информ. сборник / А.Н. Барковский [и др.]. – СПб, 2009. – 69 с.
9. Барышков, Н.К. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2009 году: информ. сборник / Н.К. Барышков [и др.]. – СПб, 2010. – 67 с.
10. Барышков, Н.К. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2010 году: информ. сборник / Н.К. Барышков [и др.]. – СПб, 2011. – 62 с.
11. Барышков, Н.К. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2011 году: информ. сборник / Н.К. Барышков [и др.]. – СПб, 2012. – 63 с.
12. Барышков, Н.К. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2012 году: информ. сборник / Н.К. Барышков [и др.]. – СПб, 2013. – 67 с.
13. Репин, В.С. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2013 году: информ. сборник / В.С. Репин [и др.]. – СПб, 2014. – 60 с.
14. Репин, В.С. Дозы облучения населения Российской Федерации по итогам функционирования ЕСКИД в 2002 – 2015 гг.: информ. сборник / В.С. Репин [и др.]. – СПб, 2015. – 40 с.
15. Барковский, А.Н. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2015 году: информ. сборник / А.Н. Барковский [и др.]. – СПб, 2016. – 72 с.
16. Барковский, А.Н. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2016 году: информ. сборник / А.Н. Барковский [и др.]. – СПб, 2017. – 78 с.
17. Барковский, А.Н. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2017 году: информ. сборник / А.Н. Барковский [и др.]. – СПб, 2018. – 69 с.
18. Барковский, А.Н. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2018 году: информ. сборник / А.Н. Барковский [и др.]. – СПб, 2019. – (в печати).

Поступила: 18.10.2019 г.

Барковский Анатолий Николаевич – главный научный сотрудник, руководитель Федерального радиологического центра Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: ANBarkovski@yandex.ru

Братилова Анжелика Анатольевна – научный сотрудник лаборатории внутреннего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Кормановская Татьяна Анатольевна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории дозиметрии природных источников Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Ахматдинов Руслан Расимович – младший научный сотрудник Информационно-аналитического центра Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Ахматдинов Рустам Расимович – ведущий инженер-исследователь Информационно-аналитического центра Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Барковский А.Н., Братилова А.А., Кормановская Т.А., Ахматдинов Р.Р., Ахматдинов Р.Р. Динамика доз облучения населения Российской Федерации за период с 2003 по 2018 г. // Радиационная гигиена. – 2019. – Т. 12, № 4. – С. 96–122. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4 -96-122

Trends in the doses of the population of the Russian Federation in 2003–2018

Anatoly N. Barkovsky, Anzhelika A. Bratilova, Tatyana A. Kormanovskaya, Ruslan R. Akhmatdinov, Rustam R. Akhmatdinov

In the last years radiation-hygienic passportization and Joint state system of control and accounting of the individual doses of the citizens have become a trusted source of the validated data on the state of the radiation safety in the Russian Federation and have become the basis of the Russian system of the information provision of the radiation safety. Annual analysis of that data is presented in the annual information bulletin "Doses of the population of the Russian Federation". The current study is focused on the analysis of the data from the information bulletins to evaluate the trends in the doses of the Russian population from main sources of ionizing exposure in 2003–2018. It is indicated that the mean annual doses from man-made exposure of the group A staff in that period varies from 1,0–1,4 mSv per year, group B – 0,65–0,8 mSv per year. The number of exceedances of the annual dose limits from group A staff varied from 5 to 52 per year; for group B – 0–22 per year. For the whole investigated period there were only three cases of the exceedance of the 50 mSv annual individual dose for group A staff and four cases of the exceedance of the 12,5 mSv annual effective dose for group B staff. Mean effective dose per X-ray examination in 2006–2013 was decreasing from 0,56 mSv to 0,26 mSv and started to slowly increase leading to 0,29 mSv in 2018. The same trends were identified for the mean dose from medical exposure per citizen: reduction in 2003–2013 from 0,86 mSv to 0,45 mSv with the subsequent increase up to 0,56 mSv. The biggest contributor for the dose from medical exposure is computed tomography: the number of CT examinations increased from 1,3 mln in 2003 to 11,7 mln in 2018; contribution to the collective dose – from 5,7% to 54%. Mean annual effective doses from natural exposure of the population of the Russian regions varied from 1,6 to 15,1 mSv per year with the mean value for Russia of 3,11 – 3,79 mSv/year. The highest mean annual doses exceeding 5 mSv in each year were observed in Republic of Altay, Jewish Independent Region, Stavropol and Zabaikalskiy Krai, Republic of Tyva and Irkutsk region. Total effective doses exceeding 10 mSv/year were observed in Republic of Altay and Jewish Independent Region. For ten subjects of the Russian Federation (Republics of Buryatia, Altay, Tyva, Stavropol and Zabaikalskiy Krai, Irkutsk and Chita regions, Jewish Independent Region, Aginsko-Buryatskiy and Ust'-Ordinskiy independent districts) they exceed 5 mSv/year for the whole assessed period.

Key words: annual effective dose, nature exposure, artificial exposure, medical exposure, dose-structured population dynamics, dose control.

References

1. Ramzaev P.V., Barkovsky A.N., Baryshkov N.K., Bruk G.Ya., Titova T.N. Bulletin. Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 1999, SPb., 2001, 29 p. (In Russian)
2. Barkovsky A.N., Baryshkov N.K., Bruk G.Ya., Kormanovskaya T.A., Kuvshinnikov S.I., Lipatova O.V., Perminova G.S., Romanovich I.K., Stamat I.P., Tutelyan O.E. Bulletin. Radiation

Anatoly N. Barkovsky

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

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

- exposure doses of the population of the Russian Federation in 2002, SPb., 2004, 61 p. (In Russian)
3. Barkovsky A.N., Baryshkov N.K., Kormanovskaya T.A., Kuvshinnikov S.I., Lipatova O.V., Perminova G.S., Repin V.S., Romanovich I.K., Stamat I.P., Tutelyan O.E. Bulletin. Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2003, SPb., 2004, 59 p. (In Russian)
 4. Barkovsky A.N., Baryshkov N.K., Kormanovskaya T.A., Kuvshinnikov S.I., Lipatova O.V., Perminova G.S., Repin V.S., Romanovich I.K., Stamat I.P., Tutelyan O.E. Bulletin. Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2004, SPb., 2005, 61 p. (In Russian)
 5. Barkovsky A.N. [et al.] Information Bulletin: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2005, SPb., 2006, 39 p. (In Russian)
 6. Barkovsky A.N. [et al.] Information Bulletin: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2006, SPb., 2007, 61 p. (In Russian)
 7. Barkovsky A.N. [et al.] Information Bulletin: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2007, SPb., 2008, 66 p. (In Russian)
 8. Barkovsky A.N., Baryshkov N.K., Kormanovskaya T.A., Kuvshinnikov S.I., Lipatova O.V., Medvedev A.Yu., Perminova G.S., Repin V.S., Romanovich I.K., Stamat I.P., Timofeeva M.A., Tutelyan O.E. Information Bulletin: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2008, SPb., 2009, 69 p. (In Russian)
 9. Baryshkov N.K., Kormanovskaya T.A., Kuvshinnikov S.I., Lipatova O.V., Medvedev A.Yu., Perminova G.S., Repin V.S., Romanovich I.K., Stamat I.P., Timofeeva M.A., Tutelyan O.E. Information Bulletin: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2009, SPb., 2010, 67 p. (In Russian)
 10. Baryshkov N.K., Bratilova A.A., Kormanovskaya T.A., Kuvshinnikov S.I., Lipatova O.V., Matyukhin S.V., Medvedev A.Yu., Repin V.S., Romanovich I.K., Stamat I.P., Stepanov V.S., Tutelyan O.E. Information Bulletin: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2010, SPb., 2011, 62 p. (In Russian)
 11. 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 Bulletin: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2011, SPb., 2012, 63 p. (In Russian)
 12. 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 Bulletin: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2012, SPb., 2013, 67 p. (In Russian)
 13. 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 Bulletin: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2013, SPb., 2014, 60 p. (In Russian)
 14. 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 Bulletin: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation according to the results of the USIDC in 2002-2015, SPb., 2015, 40 p. (In Russian)
 15. Barkovsky A.N. [et al.] Information Bulletin: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2015, SPb., 2016, 72 p. (In Russian)
 16. Barkovsky A.N. [et al.] Information Bulletin: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2016, SPb., 2017, 78 p. (In Russian)
 17. Barkovsky A.N. [et al.] Information Bulletin: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2017, SPb., 2018, 69 p. (In Russian)
 18. Barkovsky A.N. [et al.] Information Bulletin: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2018, SPb., 2019, 72 p. (in print) (In Russian)

Received: October 18, 2019

For correspondence: Anatoly N. Barkovsky – The head of Federal Radiological Centre, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P. V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Mira Str., 8, St. Petersburg, 197101, Russia; E-mail: ANBarkovski@yandex.ru).

Anzhelika A. Bratilova – Research fellow of Internal radiation laboratory of St. 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

Tatyana A. Kormanovskaya – PhD in Biology, 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, Saint-Petersburg, Russia

Ruslan R. Akhmatdinov – Junior research fellow, Information-analytical center of the St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P. V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

Rustam R. Akhmatdinov – Leading research engineer, Information-analytical center of the St-Petersburg Institute of Radiation Hygiene after P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, St-Petersburg, Russia

For citation: Barkovsky A.N., Bratilova A.A., Kormanovskaya T.A., Akhmatdinov R.R., Akhmatdinov R.R. Trends in the doses of the population of the Russian Federation in 2003–2018. Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene, 2019, Vol. 12, No. 4, pp. 96-122. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-96-122

Приложение 1

Средние годовые эффективные дозы техногенного производственного облучения персонала группы А за счет нормальной эксплуатации радиационных объектов на территории Российской Федерации

Код	Наименование субъекта РФ	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
1	Республика Адыгея	1,9	1,95	0,98	0,95	0,37	1,26	1,24	1,15	1,02	1,19	1,11	0,81	0,89	0,88	0,6	0,47
2	Республика Башкортостан	1,66	1,46	1,22	1,12	1,22	1,14	0,95	0,92	0,99	1,06	0,97	1,2	1,3	1,34	1,24	1,32
3	Республика Бурятия	2,59	1,86	1,92	2,03	1,93	1,92	1,38	1,21	1,26	1,15	1,5	1,46	1,25	1,29	1,44	1,36
4	Республика Алтай	0,72		0,01	0,01	1,26	4,49	0,75	0,77	0,86	0,95	0,81	1,29	1	1,03	0,97	0,93
5	Республика Дагестан	5,08	3,62	3,26		2,91	1,17	1,14	1,2	1,77	1,17	0,61	0,51	0,67	0,62	0,77	0,58
6	Республика Ингушетия					0,77	0,38	0,37	0,37	0,44	0,41	0,39	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
7	Кабардино-Балкарская Республика	0,22	0,2	0,22	0,22	0,24	0,18	0,12	0,12	0,17	0,15	0,53	0,62	0,29	0,36	0,36	0,40
8	Республика Калмыкия	0,67	1,45	0,71	0,58	0,36	0,33	0,56	0,55	1,22	0,67	1,07	1,68	0,98	0,87	1,31	1,04
9	Карачаево-Черкесская Республика			2,72	2,17	2,4	2,23	0,82	1,06	1,02	1,03	0,93	0,64	0,8	0,82	0,97	0,82
10	Республика Карелия	0,9	1,01	0,95	0,94	0,85	0,87	0,99	0,87	0,74	0,67	0,71	0,74	0,74	0,71	0,67	0,68
11	Республика Коми	2,38	2,01	1,56	1,62	1,69	1,4	1,36	1,31	1,31	1,56	1,43	1,27	1,25	1,36	1,5	1,48
12	Республика Марий Эл	2,13	2,35	2,27	1,91	1,91	1,84	1,67	1,69	1,56	1,42	1,48	1,48	1,24	1,23	1,15	1,12
13	Республика Мордовия	1,45	0,51	1,24	1,72	1,88	1,42	1,41	1,55	1,6	1,44	1,15	0,86	0,9	1,22	1,09	1,03
14	Республика Саха (Якутия)	0,86	0,56	0,64	0,55	0,65	0,73	0,86	0,77	0,95	0,83	0,81	0,91	0,84	0,82	0,88	0,90
15	Республика Северная Осетия – Алания	0,75	0,8	1,12	0,96	0,79	0,89	1,14	1,22	0,9	1,17	1,06	0,95	1,23	1,33	1,14	1,20
16	Республика Татарстан	0,88	1,04	1,09	1,17	1,13	0,76	0,75	0,58	0,49	1,15	0,99	0,9	0,72	0,72	0,74	0,82
17	Республика Тыва					0,64	0,52	1,11	1,22	1,24	1,06	0,66	0,62	0,69	0,87	0,96	1,01
18	Удмуртская Республика	2,1	2,22	1,28	1,52	1,25	1,01	1,02	0,58	0,47	0,56	0,72	0,7	0,63	0,66	0,82	1,45
19	Республика Хакасия	0,39	0,46	0,45	0,45	0,44	0,28	0,3	0,28	0,23	0,27	0,26	0,29	0,31	0,38	0,47	0,48
20	Чеченская Республика					0,04		0,11	0,11	0,17	0,42	0,76	0,75	0,66	0,59	0,59	0,59
21	Чувашская Республика	0,89	0,97	1,15	1,22	1,06	1,68	1,37	1,51	1,48	1,28	1,61	1,36	1,18	0,9	0,93	1,02
22	Алтайский край	0,98	1,01	1,13	0,98	1,06	1,39	1	1	1,13	1,17	0,83	0,89	0,85	0,58	0,68	0,82
23	Краснодарский край	1,43	1,22	0,63	1,03	1,04	1,06	1,18	1,03	0,97	0,9	0,76	0,74	0,97	0,75	0,82	0,78
24	Красноярский край	1,29	0,86	0,98	1	0,86	0,74	0,69	0,64	0,67	0,72	0,9	0,92	0,76	0,98	0,78	1,09
25	Приморский край	0,98	0,98	1,09	1,19	0,97	0,78	0,93	1,07	0,84	0,93	0,97	0,99	1	0,98	1,06	0,97
26	Ставропольский край	1,66	2,12	1,92	2,06	2,05	2,24	1,25	1,41	1,28	1,44	1,39	1,21	1,13	1,04	1,06	1,06
27	Хабаровский край	1,2	1,23	1,28	1,3	1,21	1,03	1,01	0,96	0,98	0,74	0,92	0,86	1,01	1,07	1,26	1,33

Код	Наименование субъекта РФ	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
28	Амурская область	0,59	0,54	0,61	0,82	0,84	1,07	1,14	1,13	0,96	0,96	1,15	1,06	1,19	1,34	1,65	1,48
29	Архангельская область	0,74	0,73	0,79	0,64	0,7	0,75	0,64	0,71	0,82	0,93	0,84	0,86	0,82	0,88	1,17	1,02
30	Астраханская область	1,32	1,05	1,05	0,93	1,11	0,88	0,98	0,71	0,66	0,71	0,64	0,48	0,77	0,63	0,59	0,59
31	Белгородская область	0,82	0,52	0,69	0,74	0,6	0,56	0,48	0,8	0,59	0,57	0,59	0,5	0,46	0,43	0,46	0,53
32	Брянская область	1,69	1,56	1,32	1,3	0,92	0,7	0,53	0,98	0,8	0,83	0,86	0,79	0,64	0,66	0,79	0,70
33	Владимирская область	1,16		1,19	0,98	1,04	0,96	0,83	0,88	0,83	0,7	0,61	0,68	0,73	0,72	0,81	0,76
34	Волгоградская область		0,84	1,27	1,2	1,04	1,19	1,06	0,97	1,01	0,98	0,86	0,69	0,72	0,78	0,83	0,75
35	Вологодская область	1,62	1,4	1,55	1,27	1,51	1,37	1,32	0,99	1,05	1,23	1,32	1,5	1,43	1,34	1,5	1,44
36	Воронежская область	2,15	1,98	2,08	2,21	2,12	2,01	1,7	1,61	1,47	1,11	0,97	0,94	0,96	0,83	0,79	1,10
37	Ивановская область	0,37	0,37		0,36	0,49	0,73	0,8	0,87	0,81	1,13	1,03	0,75	0,62	0,62	0,51	0,55
38	Иркутская область	1,34	1,31	1,49	1,39	1,34	1,41	1,45	1,38	1,49	1,39	1,35	1,45	1,36	1,58	1,48	1,54
39	Калининградская область	0,88	0,49	0,45	0,4	0,52	0,51	0,46	0,54	0,49	0,47	0,48	0,52	0,44	0,56	0,54	0,71
40	Калужская область	1,37	1,83	1,57	1,17	1,43	1,21	1,15	1,01	0,93	0,74	0,98	0,92	1,02	1,23	1,89	1,69
41	Камчатский край	1,26	1,16	0,99	0,88	0,83	0,44	0,43	0,44	0,48	0,51	0,46	0,47	0,48	0,54	1,01	1,05
42	Кемеровская область	1,65	1,37	1,42	0,69	1,54	1,55	1,61	1,38	1,31	1,32	1,48	1,27	1,42	1,41	1,4	1,44
43	Кировская область	0,83	0,65	0,78	0,74	0,96	0,87	0,74	0,79	0,57	0,59	0,7	0,65	0,73	0,85	0,73	0,65
44	Костромская область	1,33	0,45	0,29	0,53	1,05	1,01	1,19	0,98	0,94	0,88	1,13	0,95	0,86	0,69	0,69	0,69
45	Курганская область	0,98	1	1,1	1,14	1	0,88	0,99	0,69	0,66	1,07	0,71	0,6	0,79	0,86	1,01	0,93
46	Курская область	0,57	0,52	0,48	0,51	0,54	0,53	0,43	0,36	0,32	0,46	0,84	0,69	0,76	0,79	1,68	1,77
47	Ленинградская область	0,85	0,84	1,24	0,82	0,85	0,71	0,85	0,87	0,79	0,72	0,95	1,09	1,23	1,07	2,21	1,97
48	Липецкая область	3,5	3,51	3	2,74	1,08	0,77	0,79	0,93	0,85	0,75	0,58	0,69	0,69	0,64	0,65	0,79
49	Магаданская область	2,43	2,15	2,08	1,85	1,61	1,4	1,41	1,04	1,3	1,12	0,62	0,63	0,78	1,13	0,83	0,66
50	Московская область	1,5	1,52	1,1	1,23	1,43	1,08	0,9	0,71	0,64	0,65	0,81	0,83	0,78	0,8	0,84	0,87
51	Мурманская область	1,28	1,01	1,03	0,88	1,4	1,35	1,14	0,89	0,82	0,76	0,89	0,73	0,79	0,84	1,31	1,73
52	Нижегородская область	0,57	0,16	0,7	0,56	0,49	0,72	0,57	0,77	0,68	0,58	0,6	0,54	0,58	0,57	0,51	0,43
53	Новгородская область	0,54	0,34	0,39	0,57	0,51	0,44	0,77	0,64	0,65	0,67	0,73	0,82	1,1	1,21	1,76	1,68
54	Новосибирская область	0,93	0,74	0,68	0,63	0,52	0,55	1,04	1,05	1,04	1	0,96	0,95	1,01	0,85	1,11	1,04
55	Омская область	1,27	1,37	1	1,07	0,94	1,17	1,11	1,26	1,19	1,4	1,88	1,5	1,31	1,4	1,36	1,16

Продолжение приложения 1

Код	Наименование субъекта РФ	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
56	Оренбургская область	2,18	2,28	1,45	1,66	1,36	1,4	1,53	1,69	1,38	1,45	1,4	1,44	1,46	1,56	1,35	1,49
57	Орловская область	0,38	0,2	0,13	0,09	0,14	0,4	0,43	0,45	0,64	0,66	0,56	0,64	0,59	0,62	1,02	0,99
58	Пензенская область	1,78	1,58	1,58	2,33	2	1,6	1,49	1,22	1,26	1,49	1,28	1,21	1,27	1,16	1,16	1,15
59	Пермский край	2,23	2,19	2		2,28	2,44	2,31	2,36	1,68	1,81	1,61	1,72	2,08	1,94	2,25	2,40
60	Псковская область	2,34	2,88	3,12	2,41	1,14	1,47	1,39	1,7	1,65	1,25	1,35	1,22	1,04	1,53	1,56	1,81
61	Ростовская область	1,83	1,79	1,67	1,82	1,72	1,66	1,58	1,49	1,39	1,22	1,23	1,24	1,2	1,18	0,54	0,74
62	Рязанская область	0,57	0,53	0,43	0,53	0,56	0,52	0,37	0,34	0,31	0,65	0,78	0,88	0,77	0,57	0,52	0,69
63	Самарская область	2,25	2,6	2,24	2,15	2,72	2,54	1,44	1,52	1,49	1,15	1,11	1,05	1,07	1,09	0,99	1,09
64	Саратовская область	2,41	0,91	1,65	1,15	0,95	0,88	0,63	0,54	0,47	0,47	0,49	0,51	0,53	0,61	0,75	0,78
65	Сахалинская область	0,51	0,91		1,22	0,98	0,91	0,62	0,52	0,73	0,72	0,74	0,7	0,71	0,91	0,92	1,13
66	Свердловская область	1,74	1,65	1,11	1,52	1,16	1,22	1,15	1,17	1,14	0,98	0,85	0,94	0,95	0,98	0,86	0,86
67	Смоленская область	0,54	0,79	0,67	1,34	1,6	1,62	1,53	1,47	1,46	1,34	1,29	1,26	1,25	1,21	2,03	1,75
68	Тамбовская область	2,14	0,33	0,7	0,73	0,52	0,39	0,4	0,64	0,62	0,53	0,87	0,82	1,07	0,87	0,69	0,59
69	Тверская область	1,81	1,69	1,28	1,5	1,25	0,98	1,13	1,23	1,1	1,3	1,36	1,21	1,16	1,16	0,78	0,69
70	Томская область	1	1,95	1,32	1,09	1,1	1,17	1,2	1,05	1,08	0,91	0,88	0,85	0,76	0,81	1,1	1,20
71	Тульская область	1,81	2,12	2,3	1,71	1,54	1,39	1,17	1,12	1,05	1,39	1,35	1,28	1,13	1,19	1,13	1,25
72	Томенская область	2,19	2,18	1,7	1,57	1,53	1,34	1,04	1,09	1,13	1,24	1,15	0,89	0,98	1,01	0,98	0,90
73	Ульяновская область	0,83	0,74	0,25	0,44	0,61	0,45	0,5	0,51	0,75	0,57	0,54	0,45	0,48	0,61	2,35	2,05
74	Челябинская область	1,74	1,54	1,45	1,29	1,35	1,43	1,46	1,45	1,32	1,17	1,06	1,1	0,98	1,04	1,86	1,77
75	Забайкальский край						1,22	1,05	1,27	1,22	1,32	1,27	1,13	1,02	1,44	2,87	2,84
76	Ярославская область	1,23	0,47	0,92	1,03	0,94	0,86	0,85	0,85	0,96	0,89	0,96	0,88	0,88	0,77	0,81	0,75
77	Москва	1,18	1,19	0,95	1,13	1,07	1,11	1,03	1,02	1	0,98	0,96	0,92	1,01	1,19	1,14	1,08
78	Санкт-Петербург	0,83	0,78	0,68	0,71	0,69	0,67	0,61	0,69	0,69	1,1	1,41	1,41	1,33	1,37	1,32	1,29
79	Еврейская автономная область	0,72	0,63	0,73	0,64	0,59	0,54	0,59	0,53	0,56	0,5	0,52	0,54	0,75	0,68	0,84	0,54
83	Ненецкий автономный округ	1,44				1,73	0,41	0,35	0,81	0,82	0,7	0,77	0,82	1,01	1,31	1,24	0,92
86	Ханты-Мансийский автономный округ – Югра	1,96	2,18	1,87	2,22	2,07	1,96	1,7	1,88	1,72	1,85	1,81	1,8	1,67	1,68	1,48	1,08
87	Чукотский автономный округ	0,24	0,21	0,72	0,48	1,76	1,2	0,83	0,64	0,54	0,38	0,32	0,32	0,29	0,32	3,28	1,54
89	Ямало-Ненецкий автономный округ	4,47	2,57	2,01	2,08	2,84	2,48	1,93	2,13	1,9	2,38	2,37	2,6	2,21	2,41	2,7	3,41

Окочание приложения 1

Код	Наименование субъекта РФ	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
82	Республика Крым														1,09	1,14	2,65
92	Севастополь														1,55	1,52	0,68
75*	Читинская область	0,54	2,56		0,9	1,25											
80*	Агинский Бурятский автономный округ				0,89												
81*	Коми-Пермяцкий автономный округ	1,44	1,49	1,28													
84*	Таймырский автономный округ	0,68															
85*	Усть-Ордынский Бурятский автономный округ			1,12													
	Всего	1,43	1,35	1,28	1,21	1,25	1,2	1,09	1,07	1,01	1,04	1,06	1,03	1,04	1,06	1,23	1,23

Приложение 2

Средние годовые эффективные дозы техногенного производственного облучения персонала группы Б за счет нормальной эксплуатации радиационных объектов на территории Российской Федерации

Код	Наименование субъекта РФ	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
1	Республика Адыгея	1,1	0,74	0,92	0,98	0,37	0,83	0,88	0,86	0,88	0,87	0,8	0,75	0,89	0,85	0,62	0,49
2	Республика Башкортостан				0,83	0,28	0,33	0,45	0,32	0,41	0,39	0,35	0,51	0,55	0,62	0,43	0,47
3	Республика Бурятия	1,98	0,17	2,05	0,62	0,98	0,57	0,72	0,83	0,59	0,55	0,99	1,17	0,81	0,91	0,7	0,62
4	Республика Алтай					0,65		0,44	0,34	0,93	0,68	0,53	1,78	1,47	1,57	0,87	0,94
5	Республика Дагестан								0,9	1,67	0,96	0,97	0,1	0,07	0,1	2,21	0,50
6	Республика Ингушетия					0,35	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,38
7	Кабардино-Балкарская Республика														0,36	0,44	0,45
8	Республика Калмыкия																
9	Карачаево-Черкесская Республика								1,38	1,41	1,18	0,95	0,69	0,86	0,81	0,89	0,58
10	Республика Карелия	0,05	0,13	0,12	0,23	0,68	0,77	0,72	0,59	0,54	0,72	0,57	0,59	0,6	0,5	0,42	0,57
11	Республика Коми		0,37	1,3	3,81	0,7	0,53	0,6	0,81	1,36	1,32	0,99	0,79	1	1,49	1,48	1,16
12	Республика Марий Эл	0,36	0,85	1,03	0,78	1,11	1,17	1,17	1,25	1,11	1,01	1,11	1,08	1,09	1,14	1,07	1,12
13	Республика Мордовия	1,45	1,76	1,24	0	2,15	0,87	0,64	0,82	2,25	0,95	0,62	0,5	0,91	1,31	1,82	1,82
14	Республика Саха (Якутия)	0,79	0,2	0,37	0,33		0,1	0,15	0,15	0,16	0,27	0,35	0,37	0,44	0,46	0,46	0,39
15	Республика Северная Осетия – Алания					1,16											
16	Республика Татарстан		1,3		1,03	0,69	0,55	0,55	0,25	0,29	0,61	0,8	0,85	0,59	0,6	0,54	0,51

Продолжение приложения 2

Код	Наименование субъекта РФ	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
17	Республика Тыва						0,67	0,54	0,81	0,52	0,53	0,54	0,42	0,53	0,23	0,14	0,63
18	Удмуртская Республика						0,3	0,69	0,36	0,52	0,62	1,09	0,96	0,55	0,67	0,64	0,51
19	Республика Хакасия			0,04		0,14	0,16		0,04	0,09	0,09	0,24	0,22	0,18	0,11	0,07	0,14
20	Чеченская Республика							0,3	0,33	0,19	0,31	0,53	0,52	0,54	0,47	0,49	0,46
21	Чувашская Республика				1,54	1,04	0,84	1	1,63	1,52	1,35	1,71	1,28	0,98	0,85	0,64	1,05
22	Алтайский край					1,07	1,29	0,92	1,02	0,96	1,15	0,67	0,72	0,79	0,47	0,64	0,71
23	Краснодарский край	0,6	0,69	0,74	0,63	0,63	0,54	0,71	0,66	0,7	0,84	0,65	0,73	0,78	0,89	0,83	0,86
24	Красноярский край	0,12	0,12	0,18	0,16	0,16	0,15	0,2	0,33	0,4	0,48	0,69	0,75	0,84	0,88	0,48	0,48
25	Приморский край		0,78			0,63	0,53	0,79	1,06	0,54	0,37	0,67	0,76	0,76	1,04	0,8	0,75
26	Ставропольский край	1,38	1,29	1,22	1,56	2,48	0,81	0,81	0,94	0,85	1,04	0,9	0,73	0,69	0,97	0,77	0,87
27	Хабаровский край		2,45				1,15	1,04	0,73	0,62	0,77	0,89	1,03	0,9	1,06	1,06	1,39
28	Амурская область	0,09	0,09						0,6	0,52	0,76	0,92	0,54	1,11	1,33	1,28	0,96
29	Архангельская область			0,61	0,65	1,15	0,86	0,71	0,71	0,83	1,02	0,92	0,83	0,75	0,68	0,61	0,67
30	Астраханская область		1,17	1,29	0,53	0,52	0,49	0,31	0,35	0,35	0,14	0,31	0,29	0,31	0,39	0,34	0,40
31	Белгородская область	0,28		1,36	0,55	0,55	0,4	0,35	0,77	0,64	0,46	0,51	0,43	0,41	0,36	0,37	0,39
32	Брянская область		0,97			0,69	0,21	0,16	0,74	0,33	0,17	0,41	0,37	0,27	0,22	0,29	0,22
33	Владимирская область	0,14		0,23	0,48	0,58	0,53	0,46	0,59	0,39	0,66	0,48	0,57	0,65	0,84	0,82	0,74
34	Волгоградская область			0,1		1,03	0,97	0,77	0,68	0,71	0,69	0,87	0,47	0,47	0,8	0,79	0,68
35	Вологодская область							1,16	0,62	0,97	0,78	1,07	1,61	1,3	1,3	1,55	1,12
36	Воронежская область	1,05		1,15	1,26	0,99	0,97	1,01	0,85	0,84	0,67	0,59	0,59	0,62	0,63	0,39	0,57
37	Ивановская область						0,46	0,67	0,77	0,64	0,77	0,92	0,55	0,45	0,48	0,45	0,50
38	Иркутская область	1,22	1,07	0,88	1,38	1,07	1,17	1,16	0,87	1,09	1,22	1,21	1,34	1,28	1,3	0,61	0,93
39	Калининградская область				1,36	0,46	0,45	0,41	0,41	0,38	0,31	0,35	0,15	0,32	0,37	0,48	0,65
40	Калужская область	0,62	0,93	0,69	0,61	0,87	0,83	0,93	0,74	0,68	0,41	0,59	0,71	0,56	0,8	0,75	0,57
41	Камчатский край	0,55	0,17	0,18	0,11	0,1	0,16	0,08	0,11	0,11	0,15	0,18	0,11	0,16	0,18	0,05	0,05
42	Кемеровская область						1	0,5	0,58	0,52	0,74	0,65	1,24	0,59	0,66	0,59	0,81
43	Кировская область				0,5	0,66	0,46	0,43	0,42	0,41	0,54	0,42	0,44	0,42	0,48	0,44	0,35
44	Костромская область					1,75	0,04	0,3	0,32	0,61	0,57	0,98	0,7	0,44	0,47	0,45	0,53

Код	Наименование субъекта РФ	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
45	Курганская область						1,08	1,01	0,52	0,62	0,71	0,56	0,54	0,81	0,83	0,66	0,98
46	Курская область				0,37	0,42	0,4	0,33	0,2	0,12	0,16	0,97	0,69	0,68	0,72	1,21	1,21
47	Ленинградская область	0,21	0,25	0,3	0,49	0,48	0,44	0,44	0,34	0,28	0,3	0,4	0,46	0,5	0,45	0,54	0,42
48	Липецкая область		2,81	2	2,77	1,93	0,54	0,75	1,24	0,93	0,94	0,64	0,61	0,47	0,56	0,65	0,73
49	Магаданская область	1,05	2,28	0,38	0,47	0,25	0,26	0,34	0,33	0,74	0,55	0,29	0,28	0,31	0,22	0,16	0,11
50	Московская область		1,59	0,67	0,61	0,92	0,68	0,65	0,6	0,26	0,41	0,57	0,67	0,69	0,78	0,51	0,59
51	Мурманская область					0,71	0,39		2,01	0,61	0,41	0,62	0,3	0,49	0,33	0,21	0,20
52	Нижегородская область			0,25	0,27	0,39	0,64	0,45	0,69	0,66	0,52	0,7	0,49	0,54	0,56	0,47	0,38
53	Новгородская область						0,06	0,43	0,31	0,38	0,36	0,37	0,34	0,66	0,84	1,65	1,46
54	Новосибирская область	0,41	1,02	0,25	0,4	0,32	0,52	0,48	0,78	1	0,91	0,69	0,6	0,77	0,52	1,05	1,18
55	Омская область			0,47	0,79	1,26	1,52	1,23	1,12	1,16	1,08	1,31	1,43	1,56	1,45	1,58	1,34
56	Оренбургская область		2,95	1	1,24	0,92	1,1	1,01	1,29	1,29	0,96	0,88	1,24	1,09	1,01	1,22	1,05
57	Орловская область					0,03	0,06	0,38	0,33	0,52	0,52	0,65	0,57	0,59	0,6	1,2	1,20
58	Пензенская область	1,91		2,04	1,12	1,37	1,32	0,98	0,84	0,65	1,02	0,89	0,88	1,15	0,93	0,88	0,74
59	Пермский край					1,61	1,28	1,6	1,39	1,17	1,11	1,04	1,09	1,19	0,91	0,91	0,93
60	Псковская область		1,54	2,26	1,77	1,07	1,6	1,86	2,11	1,49	1,25	1,66	1,58	1,39	1,67	1,96	2,28
61	Ростовская область	2,08	2,15	1,99	1,47	0,68	0,71	0,6	0,77	0,8	0,68	0,71	0,74	0,88	0,67	0,83	0,85
62	Рязанская область	0,01	0,19	0,14	0,3	0,31	0,2	0,13	0,14	0,15	0,5	0,64	0,62	0,59	0,39	0,36	0,41
63	Самарская область	1,49	2,03	1,7	1,52	1,76	1,75	0,84	0,95	0,89	0,83	0,82	0,95	0,97	0,9	0,95	1,16
64	Саратовская область		0,13	0,42	0,52	0,54	0,51	0,53	0,34	0,28	0,37	0,42	0,41	0,4	0,52	0,47	0,46
65	Сахалинская область		0,37		0,41				0,48	0,52	0,13	0,2	0,22	0,31	0,54	0,64	0,74
66	Свердловская область		0,46	0,75	0,91	0,73	0,83	0,67	0,91	0,81	0,7	0,65	0,76	0,78	0,8	0,52	0,54
67	Смоленская область	0,32	0,86	0,05	0,43	1,72	1,5	1,6	1,31							1,8	0,60
68	Тамбовская область			0,36					0,36	0,28	0,16	0,82	0,46	0,93	1,07	0,96	0,71
69	Тверская область	0,52	0,35	1,21	1,28	0,47	0,27	0,95	0,46	0,48	0,93	0,69	0,67	0,65	0,51	0,65	0,54
70	Томская область		2,49	1,2	0,34	0,34	0,41	0,27	0,3	0,28	0,2	0,29	0,67	0,61	0,64	0,23	0,37
71	Тульская область		0,97	1,61	1,26	0,87	0,67	0,63	0,58	0,66	0,97	0,81	1,02	0,99	0,9	0,82	1,00
72	Тюменская область					0,17	0,71	0,26	0,23	0,25	0,67	0,68	0,82	0,76	1,06	0,87	0,76

Окончание приложения 2

Код	Наименование субъекта РФ	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
73	Ульяновская область			0,05	0,11	0,2			1,14	1,08	0,44	0,51	0,52	0,42	0,46	0,39	0,74
74	Челябинская область		1,31	1,19		1,26	1,31	1,49	0,56	0,59	0,88	0,9	0,91	0,81	0,85	0,6	0,49
75	Забайкальский край						0,17	0,42	0,82	0,93	0,86	0,54	0,87	0,68	0,39	0,66	0,96
76	Ярославская область				0,87	0,71	0,63	0,69	0,94	0,94	0,59	0,94	0,8	0,83	0,69	0,73	0,21
77	Москва		0,53	0,96	1,13	0,93	0,96	0,93	0,32	0,28	0,92	0,97	1,06	1,04	1,19	1,13	0,90
78	Санкт-Петербург	0,46	0,39	0,15	0,36	0,4	0,29	0,3	0,4	0,2	0,66	1,02	0,89	0,78	0,86	0,71	0,66
79	Еврейская автономная область	0,24	0,3	0,23	0,24	0,18	0,18	0,21	0,79		0,32	0,25	0,33	0,36	0,31	0,35	0,67
83	Ненецкий автономный округ								0,72	0,55	0,26	0,19	0,26	0,27	0,37	0,3	0,85
86	Ханты-Мансийский автономный округ – Югра	0,58	0,85	0,84	0,68	0,57	0,73	0,67	0,13	0,49	0,6	0,78	0,65	0,55	0,64	0,64	0,31
87	Чукотский автономный округ				2,47						0,5	0,24	0,34	0,22	0,69	0,73	0,80
89	Ямало-Ненецкий автономный округ					2,7	1,14	0,24			1,06	1,16	0,95	1,23	1,14	1,09	0,60
82	Республика Крым														0,87	1,12	0,86
92	Севастополь														0,59	0,54	0,35
75*	Читинская область				0,05	0,5											
80*	Агинский Бурятский автономный округ				0,5												
81*	Коми-Пермяцкий автономный округ			0,89													
84*	Таймырский автономный округ																
85*	Усть-Ордынский Бурятский автономный округ																
	Всего	0,66	0,7	0,65	0,77	0,75	0,77	0,67	0,67	0,68	0,71	0,79	0,8	0,79	0,8	0,67	0,65

Приложение 3
Динамика средних годовых эффективных доз медицинского облучения населения субъектов Российской Федерации
в расчете на одну рентгенорадиологическую процедуру, мЗв/проц.

Код	Субъект РФ	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
1	Республика Адыгея		0,30	0,37	0,35	0,34	0,23	0,26	0,26	0,24	0,35	0,35	0,35	0,36
2	Республика Башкортостан	0,57	0,65	0,65	0,51	0,49	0,49	0,48	0,33	0,31	0,40	0,36	0,40	0,49
3	Республика Бурятия	0,32	0,34	0,27	0,27	0,28	0,32	0,28	0,23	0,22	0,25	0,29	0,29	0,32
4	Республика Алтай	0,39	0,35	0,26	0,43	0,42	0,26	0,34	0,14	0,20	0,16	0,17	0,17	0,18
5	Республика Дагестан		0,33	0,29		0,27	0,25	0,22	0,15	0,14	0,15	0,16	0,16	0,20
6	Республика Ингушетия		0,41	0,19	0,29	0,32	0,28	0,19	0,21	0,17	0,21	0,22	0,30	0,31
7	Кабардино-Балкарская Республика	0,55	0,36	0,36	0,34	0,36	0,34	0,31	0,20	0,19	0,22	0,21	0,20	0,18
8	Республика Калмыкия	0,53	0,38	0,32	0,32	0,29	0,25	0,31	0,20	0,24	0,32	0,31	0,33	0,33
9	Карачаево-Черкесская Республика	0,39	0,48	0,39	0,43	0,42	0,30	0,49	0,50	0,15	0,10	0,12	0,13	0,12
10	Республика Карелия	0,53	0,45	0,45	0,43	0,45	0,39	0,37	0,34	0,29	0,37	0,42	0,42	0,46
11	Республика Коми	0,32	0,34	0,32	0,32	0,33	0,34	0,29	0,29	0,30	0,30	0,29	0,30	0,31
12	Республика Марий Эл	0,42	0,34	0,19	0,15	0,15	0,14	0,14	0,15	0,14	0,18	0,18	0,17	0,18
13	Республика Мордовия	0,40	0,33	0,28	0,33	0,37	0,35	0,28	0,22	0,28	0,25	0,31	0,36	0,35
14	Республика Саха (Якутия)	0,48	0,47	0,49	0,41	0,36	0,47	0,46	0,27	0,26	0,33	0,35	0,31	0,32
15	Республика Северная Осетия – Алания	0,64	0,37	0,41	0,38	0,44	0,67	0,44	0,23	0,22	0,28	0,26	0,31	0,32
16	Республика Татарстан	0,40	0,38	0,35	0,35	0,36	0,39	0,37	0,24	0,27	0,29	0,30	0,30	0,29
17	Республика Тыва	0,66		0,25	0,44	0,42	0,36	0,38	0,25	0,22	0,31	0,24	0,29	0,28
18	Удмуртская Республика	0,40	0,33	0,29	0,39	0,33	0,35	0,37	0,31	0,26	0,20	0,22	0,25	0,22
19	Республика Хакасия	0,52	0,48	0,34	0,28	0,31	0,28	0,32	0,25	0,25	0,25	0,29	0,28	0,24
20	Чеченская Республика		0,26	0,22		0,24	0,24	0,42	0,19	0,26	0,26	0,23	0,20	0,21
21	Чувашская Республика	0,31	0,20	0,15	0,18	0,19	0,18	0,17	0,21	0,19	0,22	0,24	0,25	0,24
22	Алтайский край	0,51	0,49	0,41	0,35	0,17	0,34	0,28	0,22	0,23	0,22	0,23	0,24	0,25
23	Краснодарский край	0,50	0,48	0,44	0,46	0,44	0,48	0,41	0,37	0,42	0,41	0,40	0,43	0,48
24	Красноярский край	0,57	0,50	0,49	0,51	0,41	0,40	0,30	0,40	0,41	0,37	0,39	0,37	0,37
25	Приморский край	0,49	0,39	0,35	0,37	0,33	0,31	0,27	0,22	0,21	0,17	0,24	0,28	0,25
26	Ставропольский край	0,51	0,40	0,40	0,36	0,38	0,37	0,36	0,23	0,22	0,21	0,23	0,23	0,27
27	Хабаровский край	0,45	0,38	0,46	0,24	0,32	0,21	0,26	0,25	0,26	0,21	0,28	0,33	0,35
28	Амурская область	0,59	0,44	0,43	0,36	0,33	0,46	0,49	0,24	0,27	0,24	0,29	0,29	0,38
29	Архангельская область	0,43	0,31	0,30	0,29	0,35	0,37	0,34	0,28	0,30	0,28	0,27	0,24	0,26
30	Астраханская область	0,56	0,47	0,34	0,34	0,42	0,37	0,41	0,27	0,22	0,24	0,18	0,24	0,22

Код	Субъект РФ	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
31	Белгородская область	0,35	0,30	0,25	0,22	0,22	0,20	0,25	0,26	0,27	0,30	0,30	0,32	0,35
32	Брянская область	0,40	0,35	0,28	0,31	0,34	0,34	0,31	0,21	0,23	0,27	0,28	0,26	0,23
33	Владимирская область		0,99	0,42	0,42	0,32	0,35	0,33	0,21	0,21	0,22	0,18	0,20	0,22
34	Волгоградская область	0,44	0,42	0,34	0,35	0,31	0,34	0,29	0,20	0,20	0,22	0,25	0,22	0,24
35	Вологодская область		0,68	0,32	0,29	0,27	0,24	0,23	0,19	0,20	0,18	0,20	0,18	0,21
36	Воронежская область	0,54	0,45	0,30	0,27	0,31	0,32	0,32	0,28	0,30	0,28	0,31	0,28	0,31
37	Ивановская область	0,81	0,77	0,44	0,45	0,41	0,36	0,28	0,18	0,20	0,20	0,22	0,22	0,20
38	Иркутская область	0,51	0,50	0,39	0,39	0,40	0,35	0,36	0,27	0,26	0,29	0,28	0,30	0,32
39	Калининградская область	0,33	0,28	0,27	0,29	0,28	0,30	0,30	0,30	0,33	0,39	0,39	0,41	0,38
40	Калужская область	0,55	0,56	0,44	0,46	0,50	0,44	0,44	0,29	0,33	0,31	0,30	0,36	0,43
41	Камчатский край		0,30	0,35	0,34	0,29	0,30	0,27	0,21	0,16	0,15	0,17	0,19	0,15
42	Кемеровская область		0,38	0,38	0,31	0,28	0,25	0,23	0,19	0,21	0,19	0,20	0,19	0,20
43	Кировская область	0,47	0,46	0,47	0,38	0,32	0,33	0,35	0,22	0,22	0,24	0,26	0,24	0,23
44	Костромская область	0,55	0,41	0,35	0,43	0,41	0,41	0,36	0,26	0,19	0,16	0,18	0,16	0,17
45	Курганская область	1,45	1,30	0,44	0,34	0,31	0,36	0,30	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24	0,21
46	Курская область	0,57	0,46	0,37	0,34	0,41	0,39	0,40	0,27	0,22	0,29	0,23	0,31	0,28
47	Ленинградская область	0,40	0,26	0,23	0,23	0,18	0,17	0,14	0,15	0,17	0,15	0,17	0,16	0,19
48	Липецкая область	0,35	0,32	0,28	0,29	0,30	0,29	0,30	0,22	0,21	0,26	0,27	0,29	0,25
49	Магаданская область	0,42	0,32	0,27	0,18	0,23	0,27	0,26	0,21	0,24	0,34	0,35	0,37	0,35
50	Московская область	0,55	0,49	0,45	0,43	0,43	0,39	0,43	0,32	0,28	0,26	0,29	0,28	0,25
51	Мурманская область		0,44	0,36	0,36	0,35	0,41	0,42	0,25	0,27	0,21	0,25	0,23	0,28
52	Нижегородская область	0,69	0,51	0,47	0,41	0,44	0,64	0,62	0,22	0,21	0,24	0,23	0,23	0,23
53	Новгородская область	0,54	0,42	0,32	0,29	0,32	0,27	0,27	0,17	0,16	0,17	0,18	0,20	0,19
54	Новосибирская область			0,50	0,42	0,35	0,28	0,27	0,25	0,23	0,21	0,19	0,20	0,19
55	Омская область	0,33	0,27	0,23	0,25	0,23	0,22	0,22	0,28	0,28	0,30	0,27	0,27	0,30
56	Оренбургская область			0,36	0,39	0,35	0,34	0,32	0,19	0,19	0,17	0,17	0,21	0,20
57	Орловская область	0,71	0,47	0,45	0,47	0,44	0,42	0,39	0,21	0,22	0,26	0,28	0,27	0,29
58	Пензенская область	0,44	0,39	0,33	0,34	0,47	0,39	0,43	0,25	0,25	0,25	0,24	0,20	0,33
59	Пермский край	0,53	0,44	0,43	0,40	0,41	0,40	0,38	0,25	0,25	0,22	0,24	0,27	0,26
60	Псковская область	0,86	0,58	0,42	0,42	0,33	0,37	0,22	0,21	0,24	0,23	0,23	0,18	0,27
61	Ростовская область	0,43	0,37	0,31	0,32	0,33	0,32	0,27	0,24	0,24	0,23	0,24	0,27	0,27

Код	Субъект РФ	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
62	Рязанская область	0,44	0,37	0,29	0,28	0,26	0,26	0,23	0,22	0,20	0,19	0,22	0,23	0,27
63	Самарская область	0,62	0,50	0,39	0,38	0,34	0,32	0,31	0,29	0,30	0,29	0,30	0,29	0,30
64	Саратовская область	0,55	0,28	0,24	0,23	0,22	0,22	0,24	0,19	0,20	0,19	0,20	0,22	0,21
65	Сахалинская область	0,51	0,39	0,37	0,32	0,35	0,30	0,32	0,33	0,28	0,28	0,28	0,32	0,36
66	Свердловская область	0,68	0,50	0,44	0,45	0,41	0,40	0,35	0,22	0,21	0,26	0,27	0,26	0,24
67	Смоленская область	0,53	0,72	0,57	0,41	0,39	0,52	0,48	0,26	0,35	0,25	0,23	0,25	0,25
68	Тамбовская область	0,53	0,35	0,23	0,22	0,20	0,31	0,19	0,17	0,19	0,20	0,22	0,25	0,24
69	Тверская область	0,79	0,64	0,90	0,57	0,69	0,69	0,50	0,28	0,24	0,26	0,28	0,25	0,25
70	Томская область	0,61	0,46	0,40	0,36	0,38	0,34	0,27	0,21	0,24	0,23	0,24	0,24	0,25
71	Тульская область	0,48	0,42	0,40	0,41	0,41	0,42	0,35	0,25	0,22	0,24	0,26	0,29	0,28
72	Тюменская область	0,75	0,45	0,53	0,42	0,33	0,43	0,37	0,41	0,30	0,28	0,23	0,26	0,33
73	Ульяновская область		0,37	0,32	0,32	0,26	0,35	0,36	0,32	0,34	0,29	0,32	0,40	0,32
74	Челябинская область	0,42	0,37	0,33	0,26	0,25	0,23	0,24	0,22	0,22	0,21	0,23	0,23	0,23
75	Забайкальский край	0,70	0,44	0,40	0,41	0,37	0,32	0,33	0,28	0,26	0,25	0,29	0,25	0,29
76	Ярославская область		0,57	0,34	0,36	0,35	0,37	0,31	0,22	0,19	0,21	0,19	0,22	0,23
77	Москва		0,45	0,34	0,32	0,35	0,32	0,31	0,24	0,28	0,28	0,33	0,40	0,40
78	Санкт-Петербург	0,57	0,49	0,46	0,48	0,41	0,35	0,28	0,29	0,27	0,26	0,27	0,26	0,27
79	Еврейская автономная область	0,58	0,52	0,39	0,37	0,47	0,40	0,38	0,25	0,25	0,21	0,14	0,17	0,20
82	Республика Крым										0,25	0,21	0,20	0,26
83	Ненецкий автономный округ			0,28	0,27	0,22	0,26	0,24	0,21	0,24	0,27	0,33	0,28	0,15
86	Ханты-Мансийский автономный округ – Югра	0,39	0,33	0,29	0,23	0,23	0,26	0,23	0,22	0,20	0,23	0,27	0,26	0,26
87	Чукотский автономный округ	0,31	0,35	0,34	0,38	0,41	0,42	0,45	0,30	0,19	0,27	0,30	0,25	0,26
89	Ямало-Ненецкий автономный округ	0,41	0,39	0,40	0,32	0,32	0,31	0,29	0,19	0,23	0,27	0,25	0,26	0,22
92	Севастополь										0,41	0,37	0,27	0,25
	В среднем по РФ	0,52	0,45	0,38	0,36	0,35	0,35	0,33	0,26	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29

Приложение 4

Средние годовые эффективные дозы облучения населения Российской Федерации за счет природных источников ионизирующего излучения за 2003–2018 гг., мЗв/чел.

Код	Наименование субъекта РФ	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
1	Республика Адыгея	3,35	3,49	4,72	3,00	3,56	5,06	3,90	5,61	3,64	5,02	5,19	4,89	3,57	4,37	4,20	3,70
2	Республика Башкортостан			2,78	2,88	3,50	2,67	2,70	3,74	4,14	5,17	2,88	3,67	7,59	4,25	3,11	7,75
3	Республика Бурятия	6,46			5,04	5,30	4,74	3,69	4,91	6,09	3,66	3,71	3,19	3,34	7,42	4,04	4,26
4	Республика Алтай			10,07		7,39	4,27	11,72	12,48	15,10	5,18	7,72	7,04	6,96	6,89	7,35	8,19
5	Республика Дагестан			2,84	3,06	4,06	2,66	2,17	2,17	2,90	2,92	2,93	2,50	2,50	3,03	3,09	2,89
6	Республика Ингушетия				1,51*	1,51*	1,49*	1,51*	1,53*	1,54*	1,53*	1,50*	1,50*	1,51*	1,51*	1,52*	1,52*
7	Кабардино-Балкарская Республика														4,95	4,12	4,42
8	Республика Калмыкия	4,27	3,69	3,73	3,76	3,65	4,11	2,39	2,49	2,60	4,34	5,61	2,15	2,31	2,45	2,32	2,38
9	Карачаево-Черкесская Республика				4,53	3,95	3,76	3,69	3,33	4,39	4,81	6,00	4,74	4,29	4,78	4,60	4,37
10	Республика Карелия	3,27	3,80	3,72	3,10	3,34	3,33	3,38	3,13	3,13	3,30	3,38	3,28	3,77	3,37	3,25	3,30
11	Республика Коми	3,05	2,61	2,85	2,44	2,79	2,55	2,55	2,32	2,24	2,22	2,52	2,49	2,29	2,35	2,17	1,48*
12	Республика Марий Эл	3,56	2,62	2,59	2,87	1,89	1,90	2,00	2,06	2,29	2,08	2,04	2,35	2,25	2,28	2,20	2,25
13	Республика Мордовия	1,54*	1,54*	2,45	2,47	1,32	2,15	2,09	2,06	2,04	2,12	3,27	4,02	3,67	2,97	3,54	3,50
14	Республика Саха (Якутия)	4,68	3,04	4,03	3,27	5,57	4,00	4,57	2,88	3,22	4,18	3,57	3,94	3,67	4,91	2,40	4,28
15	Республика Северная Осетия – Алания	4,24	3,33	3,79	3,48	5,89	5,44	4,62	4,05	4,29	3,87	5,25		4,17	3,76	3,48	4,07
16	Республика Татарстан	3,75	3,24	2,44	2,72	2,18	2,23	2,37	4,00	3,82	3,25	3,42	3,07	3,13	3,05	3,07	2,88
17	Республика Тыва					4,62	4,76	6,92	7,19	5,06	5,63	10,14	5,65	7,09	5,28	4,45	5,68
18	Удмуртская Республика	2,38	2,39	2,28	2,45	2,50	2,67	2,56	2,58	2,90	2,33	2,67	2,84	3,45	2,84	2,87	2,51
19	Республика Хакасия	2,83		2,94		3,74	2,85	3,14	2,98	2,73	3,42	3,86	3,50	2,67	2,86	3,17	2,46
20	Чеченская Республика								2,70	2,85	2,65	1,84	1,84	1,86	1,84	2,37	2,29
21	Чувашская Республика	4,39	4,59	3,51	3,56	3,32	3,58	3,05	3,02	3,25	3,76	2,85	3,44	3,54	3,71	2,93	2,94
22	Алтайский край	4,66	4,36	3,94	4,38	4,23	5,86	3,92	3,24	3,72	3,58	3,94	3,86	4,06	4,03	4,11	3,72
23	Краснодарский край	3,86	3,15	2,71	3,11	2,67	2,81	2,45	2,59	2,51	2,63	2,63	2,87	2,51	2,48	2,54	2,69
24	Красноярский край	4,09	4,80	4,51	3,35	3,41	3,88	3,50	3,07	4,08	3,56	4,13	3,34	3,11	3,65	3,42	2,21
25	Приморский край	4,24	3,96	4,46	3,64	3,36	3,81	3,58	3,22	3,11	2,58	2,88	2,51	3,26	3,08	3,16	2,92
26	Ставропольский край	6,57	7,51	6,69	4,02	4,19	5,13	7,85	3,75	4,82	4,15	4,42	4,55	5,97	5,14	10,84	6,15
27	Хабаровский край	4,89	4,32	4,43	3,96	3,56	3,49	3,85	3,14	3,65	3,13	3,42	2,88	2,46	2,40	2,19	2,23

Код	Наименование субъекта РФ	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
28	Амурская область	3,80	4,24	3,63	3,60	4,14	4,25	4,74	4,45	4,80	3,71	4,46	3,86	4,08	4,12	3,75	3,78
29	Архангельская область	3,02	1,65*	2,91	2,43	2,15	1,91	2,32	2,59	2,60	2,74	2,32	2,75	2,42	2,13	3,43	2,72
30	Астраханская область	1,20*	2,58	2,40	2,41	2,44	2,50	2,07	2,08	2,15	2,17	2,11	2,11	2,09	2,10	2,10	2,10
31	Белгородская область	2,70	3,02	2,79	2,64	2,71	3,85	3,26	3,57	3,90	4,01	3,90	3,41	3,80	4,28	4,22	3,79
32	Брянская область	4,23	2,59	3,01	2,84	2,81	3,07	2,75	2,86	2,74	2,77	2,45	2,58	2,41	2,40	2,38	2,38
33	Владимирская область	4,10	2,17	2,58	2,59	2,22	2,54	2,30	2,46	3,06	2,91	3,17	3,17	2,69	3,27	2,47	2,62
34	Волгоградская область	3,58				2,21	2,17	2,50	1,90	1,92	3,09	3,31	3,04	2,66	2,67	2,72	2,71
35	Вологодская область		3,75	3,95	3,43	3,09	2,82	3,00	3,12	3,06	2,87	3,42	3,60	3,23	3,12	3,41	3,57
36	Воронежская область	3,11	3,14	2,55	2,39	2,59	2,35	2,47	2,36	2,54	2,92	2,35	2,57	2,90	2,94	3,71	3,23
37	Ивановская область	4,74	5,07	4,84	4,39	4,23	4,65	5,22	4,12	4,15	4,30	4,47	4,86	5,41	3,94	4,38	5,04
38	Иркутская область	8,06	5,61	4,99	5,73	2,88	3,36	7,56	3,38	2,72	5,02	9,01	4,80	4,85	5,34	3,90	10,06
39	Калининградская область	4,72	5,17	2,67	3,75	2,73	2,60	2,51	2,50	2,64	2,76	2,90	2,71	2,82	2,77	2,48	3,25
40	Калужская область	3,89	4,51	4,89	4,28	4,39	4,88	4,40	3,95	3,72	3,80	3,69	3,85	3,19	3,44	3,06	3,66
41	Камчатский край	2,64	2,49	2,46	2,13	2,33	2,34	2,26	2,30	2,25	2,37	2,29	2,24	1,93	1,97	2,03	2,10
42	Кемеровская область	3,49	4,88	5,36	4,18	4,20	4,23	3,75	3,86	4,48	5,00	4,18	4,45	4,48	4,98	4,80	4,64
43	Кировская область	3,01	3,41	3,50	3,15	3,27	3,40	3,31	2,99	3,26	2,57	2,35	2,91	2,92	2,54	2,66	2,46
44	Костромская область	1,82	2,42	2,02	2,12	2,12	2,30	2,45	2,90	2,68	2,70	3,00	3,25	3,10	3,13	2,90	3,51
45	Курганская область	4,14	5,19	3,53	3,58	3,23	3,18	3,97	3,62	4,35	4,04	4,37	3,09	2,84	2,91	3,21	3,32
46	Курская область	3,58	4,02	4,51	3,59	3,31	3,52	3,54	2,81	3,46	2,61	2,65	2,72	2,99	2,65	3,01	2,56
47	Ленинградская область	3,07	3,06	2,89	2,48	3,01	5,67	3,89	4,35	3,08	3,09	3,42	3,22	3,06	3,08	5,41	5,06
48	Липецкая область	6,85	5,53	4,23	4,96	3,34	3,11	3,31	2,91	2,94	2,80	2,33	2,28	2,23	2,66	2,34	2,37
49	Магаданская область	1,37*		1,45*	3,84	2,54	1,45*	1,52*	1,49*	1,54*	10,90	1,39*	1,35*	1,45*	1,38*	1,38*	1,33*
50	Московская область		3,10	3,02	2,76	2,70	4,06	3,00	2,99	3,11	3,06	2,98	3,69	3,29	3,69	3,08	2,41
51	Мурманская область	2,84	3,00	3,18	3,07	3,01	3,04	3,25	2,93	2,95	3,11	3,01	2,94	3,07	3,08	3,09	3,04
52	Нижегородская область	3,41	4,44	3,36	3,27	2,79	3,58	3,59	3,71	3,55	3,36	2,98	3,57	3,46	3,42	3,53	3,02
53	Новгородская область	5,44		4,14	3,80	2,76	2,43	2,67	3,27	3,14	2,88	3,43	3,31	2,98	3,61	3,24	2,77
54	Новосибирская область	3,26	4,76	4,55	4,52	3,81	3,47	3,59	4,18	3,29	3,05	3,35	2,89	3,23	3,44	3,90	3,20
55	Омская область	3,83	4,18	4,76	4,30	3,54	3,66	3,47	3,46	3,45	3,14	3,03	3,11	3,46	3,29	4,10	3,37
56	Оренбургская область			2,38	4,13	2,23	2,94	3,45		4,56	3,54		4,18	3,90	3,58	4,36	3,22

Код	Наименование субъекта РФ	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
57	Орловская область			3,13	4,01	2,95	2,44	2,53	2,26	2,34	2,35	2,03	1,90	1,87	1,90	1,88	1,92
58	Пензенская область	1,61*	3,22	3,18	2,94	2,65	2,79	2,79	1,33*	2,87	2,99	2,20	3,12	2,59	1,98	3,68	2,23
59	Пермский край		3,78	3,46	3,68	3,32	3,72	2,56	3,25	3,14	3,09	2,90	3,02	2,91	2,75	3,07	2,94
60	Псковская область	3,17	3,14	4,37	2,81	3,68	4,19	3,31	3,57	3,07	3,68	3,30	2,79	3,95	2,77	2,85	2,81
61	Ростовская область	5,49	4,51	5,66	5,25	4,53	3,18	3,79	3,81	3,87	3,11	3,32	4,12	3,32	4,81	3,73	3,33
62	Рязанская область	2,87	2,67	2,79	2,83	2,45	1,82	3,09	3,62	3,62	4,04	3,88	5,05	3,57	3,41	3,19	4,00
63	Самарская область					3,73	3,45	2,94	2,97	2,66	2,70	3,24	2,95	3,36	2,98	2,52	2,57
64	Саратовская область						3,57	2,94	2,94	3,16	3,10	3,34	3,59	2,75	3,00	2,96	3,17
65	Сахалинская область						2,25	2,39	2,28	2,17	1,99	1,71	1,72	1,62	3,44	5,96	3,31
66	Свердловская область	3,66	4,16	4,18	4,01	3,98	3,69	3,43	3,92	3,92	3,91	4,97	4,68	4,07	3,76	3,96	3,92
67	Смоленская область	2,55	3,34	3,58	2,87	3,48	2,28	2,32	2,24	3,09	3,05	2,68	3,03	3,00	2,31	2,22	2,16
68	Тамбовская область	2,51	2,72	2,90	2,62	2,68	2,81	2,85	2,50	2,76	3,26	3,71	3,55	3,83	3,22	2,98	2,74
69	Тверская область		2,95	2,78	2,53	2,57	2,65	2,83	2,73	2,67	2,52	2,54	2,79	2,93	2,79	2,71	2,65
70	Томская область	3,73	2,74	2,78	3,30	2,43	2,73	2,71	2,52	2,50	2,59	2,60	2,68	2,67	2,72	2,62	2,71
71	Тульская область	3,11	3,50	3,08	3,02	3,15	3,12	3,38	3,24	2,99	3,03	3,84	3,78	3,74	4,21	3,73	4,93
72	Туменская область	2,21		2,17	2,26	2,18	2,24	2,19	2,05	1,80	2,33	2,72	2,13	2,04	2,48	2,25	2,24
73	Ульяновская область	2,61	2,78	2,21	2,84	2,02	1,98	2,03	2,13	2,07	2,05	2,04	2,06	2,08	2,07	1,38*	1,32*
74	Челябинская область	3,08	3,38	3,79	3,47	5,22	3,98	3,27	3,54	4,35	4,91	3,87	4,33	4,02	3,31	4,20	4,13
75	Забайкальский край						3,93	4,63	5,71	8,41	9,41	12,46	12,93	9,38	6,24	8,13	7,57
76	Ярославская область	2,73		3,15	3,11	3,06	3,17	3,41	3,00	3,22	3,41	3,29	3,54	3,39	3,74	3,85	3,25
77	Москва	3,14	3,05	3,28	2,88	2,80	2,94	3,13	2,70	3,25	2,95	3,42	3,89	3,09	3,86	2,28	3,23
78	Санкт-Петербург	3,72	3,24	3,55	3,22	3,19	3,39	2,98	3,00	3,21	3,48	3,28	3,30	3,33	3,31	3,32	3,48
79	Еврейская автономная область	12,06	5,67	4,63	9,39	3,22	3,53	3,60	5,17	5,40	4,12	6,65	3,87	11,40	6,45	4,75	4,67
83	Ненецкий автономный округ													2,31		1,35*	2,99
86	Ханты-Мансийский автономный округ – Югра	2,85	2,77	3,28	2,71	2,40	2,71	2,74	2,60	3,92	2,63	3,56	4,03	2,30	2,50	2,44	1,55*
87	Чукотский автономный округ		2,97	1,16*	2,44		1,56*	1,74*	1,76*	4,06	1,94	2,09	2,06	2,37	2,26	2,21	2,16
89	Ямало-Ненецкий автономный округ	2,24	2,63	3,63	2,79	2,61	1,56*	3,12	2,52	3,04	2,05	2,52	2,37	2,37	2,17	2,18	2,30
82	Республика Крым													2,75	3,17	3,39	2,10
92	Севастополь													2,75	2,67	3,12	2,69

Окончание приложения 4

Код	Наименование субъекта РФ	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
75*	Читинская область	6,60	6,27	7,40	6,40	5,06											
80*	Агинский Бурятский автономный округ	1,22*	1,54*	1,99*	4,13	1,62*											
81*	Коми-Пермяцкий автономный округ																
84*	Таймырский автономный округ	1,99	2,08	2,16													
85*	Усть-Ордынский Бурятский автономный округ																
88*	Эвенкийский автономный округ	1,45*															
	Российская Федерация	3,79	3,70	3,63	3,46	3,37	3,29	3,25	3,11	3,35	3,35	3,47	3,48	3,44	3,47	3,41	3,47
* – без учета данных по ЭРОА радона в связи с их отсутствием.																	

Приложение 5

Средние суммарные годовые эффективные дозы населения субъектов Российской Федерации за счет всех основных источников ионизирующего излучения за период с 2003 по 2017 г.

Код	Наименование субъекта РФ	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
1	Республика Адыгея	3,67	3,55	3,71	3,56	3,40	3,82	3,88	4,08	3,86	4,13	4,33	4,26	4,41	4,37	4,40	4,22
2	Республика Башкортостан	3,56	3,90	3,68	3,64	3,90	3,92	3,71	3,92	3,81	4,04	3,84	3,81	4,18	4,13	4,16	8,39
3	Республика Бурятия	6,67	6,53	6,43	5,28	5,40	5,41	5,23	5,27	5,39	5,31	5,23	5,09	4,98	5,25	5,24	4,85
4	Республика Алтай	4,29	5,55	10,62	10,49	10,30	9,33	9,82	10,25	10,57	10,53	9,82	9,78	9,51	9,39	9,29	8,56
5	Республика Дагестан	6,27	3,73	2,75	3,47	3,60	3,46	3,11	3,17	3,44	3,20	3,11	3,08	3,06	3,03	3,05	3,07
6	Республика Ингушетия	5,03	4,78	4,78	4,91	4,90	4,84	4,50	4,52	4,81	4,53	4,62	4,40	4,21	4,02	4,73	1,84
7	Кабардино-Балкарская Республика	5,48	5,12	5,73	5,19	5,00	5,09	4,63	4,63	5,06	4,62	4,53	4,23	4,05	4,08	4,53	4,68
8	Республика Калмыкия	4,52	5,05	4,53	4,28	4,90	4,80	4,58	4,38	4,11	4,30	4,44	4,26	4,27	4,11	4,10	2,88
9	Карачаево-Черкесская Республика	5,64	5,46	5,07	4,97	5,10	4,85	4,74	4,73	4,50	4,82	5,03	4,62	4,56	4,59	4,61	4,53
10	Республика Карелия	3,78	3,87	4,24	3,87	3,80	3,85	3,89	3,91	3,77	3,86	3,82	3,72	3,94	4,02	4,00	4,19
11	Республика Коми	3,28	3,19	3,44	2,93	3,00	3,12	3,12	3,18	3,10	3,13	3,11	3,21	3,21	3,16	3,13	2,27
12	Республика Марий Эл	3,81	4,24	3,91	3,38	3,20	2,89	2,77	2,73	2,64	2,69	2,71	2,65	2,70	2,64	2,61	2,58
13	Республика Мордовия	3,90	3,78	3,32	2,94	2,80	2,75	2,83	2,89	2,67	2,69	2,70	2,90	2,95	3,01	3,16	4,11
14	Республика Саха (Якутия)	5,06	4,08	4,22	3,92	3,90	4,05	4,21	3,96	3,97	4,26	4,02	3,99	4,15	4,27	4,11	4,93
15	Республика Северная Осетия – Алания	4,79	4,25	4,31	4,19	4,20	4,42	4,64	4,69	5,02	4,65	4,50	4,37	4,44	4,41	4,48	4,54
16	Республика Татарстан	4,16	3,91	3,66	3,22	3,10	3,07	3,05	3,23	3,29	3,44	3,33	3,36	3,43	3,39	3,41	3,44
17	Республика Тыва	5,72	5,68	5,72	5,27	5,90	4,95	5,59	5,80	5,72	5,77	6,02	5,98	6,27	6,15	6,12	6,3

Код	Наименование субъекта РФ	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
18	Удмуртская Республика	2,83	2,99	3,24	3,12	3,00	2,97	3,07	3,04	3,10	3,19	3,11	3,07	3,02	3,00	3,10	2,81
19	Республика Хакасия	2,94	3,49	3,48	3,31	3,80	3,49	3,44	3,52	3,38	3,58	3,53	3,55	3,52	3,56	3,56	2,91
20	Чеченская Республика	6,27	4,63	4,64							2,96	2,84	2,83	2,75	2,65	2,61	2,44
21	Чувашская Республика	4,54	4,37	4,38	3,94	3,80	3,74	3,73	3,73	3,61	3,73	3,82	3,74	3,80	3,80	3,80	3,42
22	Алтайский край	5,28	5,79	5,45	5,53	5,30	4,97	4,89	4,69	4,64	4,56	4,53	4,50	4,49	4,49	4,48	4,27
23	Краснодарский край	4,36	4,19	7,72	4,19	5,80	3,89	3,98	3,85	3,53	3,78	4,11	4,05	3,68	3,97	3,89	3,58
24	Красноярский край	4,80	5,23	3,06	3,93	4,20	4,46	4,36	4,28	4,37	4,11	4,02	4,05	4,63	3,93	4,09	3
25	Приморский край	4,42	4,13	4,26	4,26	4,20	4,22	4,22	4,18	4,01	3,93	3,83	3,72	3,67	3,67	3,82	3,43
26	Ставропольский край	7,11	6,82	6,90	6,51	6,50	6,35	6,59	6,38	6,28	6,18	5,94	5,82	5,83	5,82	6,13	6,72
27	Хабаровский край	5,40	5,14	4,97	4,77	4,70	4,60	4,10	4,31	4,44	4,41	4,34	4,35	4,24	4,08	4,09	2,94
28	Амурская область	4,71	4,34	4,57	4,45	4,40	4,49	4,49	4,59	4,94	4,95	4,61	5,00	4,51	4,55	4,50	4,38
29	Архангельская область	3,52	3,15	3,42	3,03	3,00	2,77	2,74	2,87	2,84	2,97	2,92	2,95	2,94	2,85	3,00	3,24
30	Астраханская область	4,48	3,38	3,29	3,08	3,00	3,00	2,93	3,13	2,95	3,10	2,82	2,75	2,85	2,57	2,66	2,57
31	Белгородская область	3,15	3,33	3,09	3,12	3,30	3,35	3,34	3,39	3,33	3,61	3,72	3,73	3,82	3,83	3,90	4,38
32	Брянская область	4,45	3,11	3,19	3,36	3,30	3,29	3,32	3,33	3,20	3,33	3,22	3,22	3,25	3,29	3,29	2,79
33	Владимирская область	4,41	3,57	3,38	3,30	3,70	3,07	3,04	2,90	2,99	3,04	2,92	3,00	3,00	2,94	2,97	2,99
34	Волгоградская область	4,05	4,86	4,49	4,55	4,30	4,05	4,06	3,77	3,65	3,63	3,53	3,52	3,53	3,52	3,43	3,21
35	Вологодская область	4,77	4,17	4,31	4,37	4,80	3,87	3,78	3,74	3,61	3,63	3,62	3,62	3,59	3,54	3,54	3,94
36	Воронежская область	3,70	3,62	3,32	3,22	3,20	2,95	2,91	2,97	3,00	3,07	3,11	3,10	3,06	3,07	3,07	3,87
37	Ивановская область	5,19	5,16	5,25	5,14	5,40	5,15	5,17	5,10	4,82	4,92	4,83	4,85	4,93	4,90	4,88	5,48
38	Иркутская область	8,45	6,90	6,91	6,47	6,10	5,68	6,02	5,84	7,62	5,68	5,82	5,81	5,86	5,90	5,89	10,93
39	Калининградская область	4,84	4,91	4,61	4,17	4,00	3,84	3,75	3,66	3,60	3,63	3,61	3,65	3,78	3,69	3,70	3,95
40	Калужская область	4,29	4,31	4,72	5,08	5,10	4,98	5,05	5,09	4,90	4,92	4,72	4,72	4,64	4,52	4,68	4,52
41	Камчатский край	2,95	3,02	2,78	2,81	2,60	2,72	2,76	2,65	2,63	2,74	2,63	2,55	2,54	2,49	2,57	2,43
42	Кемеровская область	4,02	4,02	4,73	4,94	4,90	5,04	4,91	4,74	4,59	4,77	4,71	4,68	4,70	4,72	4,77	5,1
43	Кировская область	3,59	3,73	4,32	3,88	3,90	3,94	3,77	3,69	3,71	3,81	3,52	3,56	3,58	3,56	3,60	2,99
44	Костромская область	2,49	2,61	3,01	2,81	2,60	2,60	2,71	2,82	2,78	2,90	2,83	2,80	2,77	2,83	2,89	3,87
45	Курганская область	4,52	4,39	4,53	4,34	4,30	4,03	4,02	4,01	4,10	4,16	4,14	4,08	4,08	3,97	4,03	3,78

Продолжение приложения 5

Код	Наименование субъекта РФ	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
46	Курская область	3,80	4,01	4,62	4,34	4,20	4,10	4,06	4,08	3,98	3,92	3,81	3,64	3,77	3,60	3,73	3,04
47	Ленинградская область	3,34	3,32	3,21	3,00	2,80	3,21	3,32	3,40	3,28	3,33	3,42	3,42	3,40	3,35	3,46	5,35
48	Липецкая область	7,43	6,65	6,11	5,59	5,40	5,12	4,98	4,84	4,67	4,68	4,41	4,22	4,21	4,15	4,11	2,93
49	Магаданская область	4,58	5,26	5,33	4,93	4,50	4,39	4,05	4,09	4,03	4,93	4,82	4,52	4,77	4,61	5,17	2,38
50	Московская область	3,37	3,29	3,35	3,40	3,40	3,49	3,47	3,50	3,29	3,52	3,43	3,41	3,40	3,45	3,48	2,8
51	Мурманская область	3,00	3,19	3,93	3,87	3,90	3,63	3,74	3,68	3,74	3,70	3,61	3,42	3,42	3,55	3,54	3,79
52	Нижегородская область	3,62	4,03	3,46	4,13	3,90	3,78	3,84	3,91	4,14	4,28	3,60	3,69	3,72	3,68	3,72	3,4
53	Новгородская область	5,90	5,70	4,60	4,53	4,30	4,02	3,92	3,90	3,76	3,80	3,72	3,64	3,62	3,62	3,66	3,17
54	Новосибирская область	4,10	3,84	5,40	4,96	5,10	5,02	5,19	4,44	4,68	4,67	4,61	4,47	4,37	4,29	4,31	3,62
55	Омская область	3,93	4,33	4,91	4,87	4,70	4,55	4,51	4,42	4,31	4,32	4,44	4,37	4,36	4,20	4,24	3,99
56	Оренбургская область	4,00	4,72	4,86	5,09	4,40	4,30	4,20	4,23	4,00	4,12	4,13	4,18	4,18	4,11	4,26	3,61
57	Орловская область	4,21	4,40	4,26	4,76	4,60	4,19	4,25	4,10	3,91	3,89	3,54	3,45	3,40	3,32	3,26	2,45
58	Пензенская область	3,10	2,90	1,26	3,44	3,30	3,24	3,31	3,62	3,31	3,49	3,22	3,26	3,26	3,20	3,19	2,83
59	Пермский край	3,65	4,20	4,55	5,16	4,50	4,46	3,98	4,26	4,11	4,17	3,93	3,90	3,80	3,76	3,86	3,52
60	Псковская область	3,96	3,66	3,39	3,71	3,70	3,73	3,80	3,63	3,67	3,57	3,62	3,62	3,64	3,54	3,40	3,37
61	Ростовская область	5,78	5,94	5,96	5,73	5,60	5,34	5,21	5,14	5,04	4,89	4,81	4,77	4,67	4,67	4,64	3,79
62	Рязанская область	3,24	3,20	3,25	3,46	3,30	3,08	3,11	3,20	3,16	3,34	3,42	3,53	3,55	3,58	3,59	4,51
63	Самарская область	3,83	4,05	4,22	4,21	4,20	4,07	3,95	3,86	3,70	3,74	3,71	3,76	3,77	3,73	3,69	3,24
64	Саратовская область	3,49	2,85	3,79	3,69	3,20	3,24	3,26	3,26	3,03	3,34	3,32	3,45	3,40	3,40	3,47	3,71
65	Сахалинская область	5,52	4,87	4,09	4,10	3,70	3,39	3,33	3,34	3,04	3,29	3,33	3,03	3,06	3,09	3,40	4,28
66	Свердловская область	4,11	4,80	4,76	5,12	4,90	4,78	4,75	4,75	4,72	4,66	4,54	4,50	4,67	4,62	4,61	4,54
67	Смоленская область	2,74	3,63	3,95	3,34	3,70	3,54	3,30	3,23	3,37	3,50	3,21	3,35	3,24	3,15	3,14	2,62
68	Тамбовская область	2,76	2,63	3,41	3,28	3,10	2,99	3,02	2,98	3,09	3,04	3,12	3,23	3,31	3,31	3,36	3,22
69	Тверская область	4,15	3,69	3,48	3,47	3,30	3,68	3,26	3,32	3,24	3,25	3,03	2,96	3,00	3,00	3,02	3,28
70	Томская область	4,29	4,50	4,38	4,20	3,70	3,77	3,60	3,62	3,50	3,48	3,44	3,43	3,41	3,38	3,47	3,34
71	Тульская область	3,69	3,56	3,60	3,52	3,80	3,64	3,72	3,74	3,60	3,67	3,62	3,63	3,75	3,77	3,85	5,48
72	Тюменская область	2,92	2,65	2,97	3,36	3,00	3,32	3,10	2,92	2,57	3,06	3,22	2,55	2,86	2,76	2,84	3,06
73	Ульяновская область	3,14	3,72	4,06	3,43	3,40	3,09	2,98	2,86	3,15	3,00	2,93	2,91	2,80	2,90	3,09	1,91

Код	Наименование субъекта РФ	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
74	Челябинская область	3,65	3,87	4,44	4,04	4,30	4,34	4,18	4,13	4,11	4,36	4,33	4,27	4,28	4,24	4,30	4,65
75	Забайкальский край													7,83	7,87	7,86	8,09
76	Ярославская область	3,28	3,29	3,92	3,96	4,00	3,75	3,78	3,74	3,72	3,71	3,61	3,59	3,63	3,59	3,68	3,69
77	Москва	3,92	3,73	3,72	4,11	3,60	3,58	3,58	3,60	3,47	3,53	3,44	3,68	3,70	3,76	3,88	4,14
78	Санкт-Петербург	4,50	4,53	4,67	4,35	4,20	4,18	4,19	4,13	3,83	3,83	3,82	3,80	3,83	3,80	3,82	4,2
79	Еврейская автономная область	12,60	10,22	10,02	10,12	9,20	8,36	7,91	7,79	7,49	7,39	7,14	6,96	7,20	7,03	6,91	4,99
83	Ненецкий автономный округ	3,31	3,08	3,48										2,80	2,93	2,78	3,18
86	Ханты-Мансийский автономный округ – Югра	3,34	3,31	3,50	3,37	3,20	3,26	3,18	3,21	3,30	3,22	3,31	4,35	3,37	2,79	3,30	1,89
87	Чукотский автономный округ	3,82	3,55	3,34	3,04	3,10	3,14	3,02	3,16	3,33	3,32	3,03	2,80	3,02	3,35	2,96	2,71
89	Ямало-Ненецкий автономный округ	2,74	3,30	3,28	3,42	3,40	3,48	3,09	3,24	3,13	3,22	3,13	3,17	3,25	3,05	2,92	2,94
82	Республика Крым													2,93	3,12	3,19	2,31
92	Севастополь													3,65	3,02	3,33	3,06
75*	Читинская область	7,23	5,15	7,77	7,45	6,80	6,54	6,44	6,38	7,74	6,89	7,33	7,72				
80*	Агинский Бурятский автономный округ	6,22	5,08	5,28	5,07												
81*	Коми-Пермяцкий автономный округ	3,09	3,55	3,70													
82*	Корякский автономный округ	2,69	2,55	2,92													
84*	Таймырский автономный округ	2,44	2,18	2,96													
85*	Усть-Ордынский Бурятский автономный округ	8,22	6,76	6,67	5,48												
88*	Эвенкийский автономный округ	5,77	4,95	4,92													
	Среднее по РФ	4,30	4,21	4,25	4,23	4,10	4,02	3,97	3,95	3,99	3,95	3,86	3,88	3,88	3,86	3,90	4,03

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА 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., 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 облучения6

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

- Панов А.В., Прудников П.В., Титов И.Е., Кречетников В.В., Ратников А.Н., Шубина О.А.
Радиозкологическая оценка сельскохозяйственных земель и продукции юго-западных районов Брянской области, загрязненных радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС25
- Ramzaev V.P., Barkovsky A.N.
Estimation of the air kerma rate from ^{137}Cs and ^{134}Cs deposited on the ground in the Sakhalin region of Russia after the Fukushima accident36
- Крестинина Л.Ю., Силкин С.С., Дегтева М.О., Аксеев А.В.
Риск смерти от болезней системы кровообращения в Уральской когорте аварийно-облученного населения за 1950–2015 годы52
- Водоватов А.В.
Использование тест-объекта «контраст-деталь» для оценки возможности снижения доз облучения пациентов в цифровой рентгенографии органов грудной клетки62
- Библин А.М.
Модель риск-коммуникации с населением по вопросам радиационной безопасности и проведение на её основе научных исследований74
- Кононенко Д.В.
Анализ распределений значений объемной активности радона в воздухе помещений в субъектах Российской Федерации85
- Чипига Л.А.
Исследование программ автоматической модуляции силы тока для оптимизации протоколов сканирования в компьютерной томографии104
- 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 него115
- ДИСКУССИИ
- Губин А.Т., Сакович В.А.
Предложения по включению в НРБ–2019 раздела по радиогенному риску122
- ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА «РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА»129

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА Том 12 № 2, 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., Сарычева С.С., Библин А.М., Репин Л.В.
Современные принципы обеспечения радиационной безопасности при использовании источников ионизирующего излучения в медицине.
Часть 2. Радиационные риски и совершенствование системы радиационной защиты6

- Мироненко О.В., Балтрукова Т.Б., Башкетова Н.С., Горский Г.А., Крюкова Т.В., Федорова Е.А.
Гигиенические требования к проектированию центров и отделений позитронно-эмиссионной томографии25
- Романович И.К., Кормановская Т.А., Королева Н.А., Сапрыкин К.А.
Обоснование методологических и методических подходов к оценке доз облучения населения, проживающего в зоне влияния объектов ядерного и радиационного наследия34

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

- Andersson M., Eckerman K., Pawel D., Almén A., Mattsson S.
Improved radiation risk models applied to different patient groups in Sweden44
- Голиков В.Ю.
Метод и компьютерная программа расчета доз фотонного излучения в фантомах тела человека55
- Дегтева М.О., Шишкина Е.А., Толстых Е.И., Заляпин В.И., Шарagin П.А., Смит М.А., Напье Б.А.
Методологический подход к разработке дозиметрических моделей скелета человека для бета-излучающих радионуклидов66
- Титов Н.В.
Возможность применения дозиметров со счетчиком Гейгера–Мюллера для дозиметрии импульсного излучения76
- Храмцов Е.В.
Радиационная обстановка на территории проведения мирного ядерного взрыва «Глобус–1» до выполнения реабилитационных работ81
- ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ ПО РАДИАЦИОННОЙ ГИГИЕНЕ
- Рыбников В.Ю., Тарита В.А., Роголев К.К.
Подготовка медицинского персонала МЧС России к реагированию на радиационные аварии с использованием дистанционного обучения89
- Киселев С.М., Маренный А.М., Романов В.В.
Радон. Современные подходы к регулированию радиационной безопасности населения94
- ЮБИЛЕЙ103
- НЕКРОЛОГ106
- ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА «РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА»109

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА Том 12 № 3, 2019

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

Башков А.Н., Шейх Ж.В., Восканян С.Э., Дунаев А.П., Попов М.В., Удалов Ю.Д., Самойлов А.С.
Возможность снижения лучевой нагрузки на пациентов за счет оптимизации протокола компьютерной томографии органов брюшной полости и забрюшинного пространства в зависимости от нозологии злокачественного процесса.....6

Трапезников А.В., Николкин В.Н., Коржавин А.В., Трапезникова В.Н.
Радиационно-гигиеническая оценка содержания и распределения ^{90}Sr и ^{137}Cs в ихтиофауне Обь-Иртышской речной системы.....16

Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Варфоломеева К.В.
Вертикальное распределение ^{137}Cs в дерново-подзолистой песчаной почве на лугах и в лесах Брянской области в 2015–2016 гг.27

Финашов Л.В., Востротин В.В., Янов А.Ю.
Третий в моче у жителей города Озерска Челябинской области в 2016 г.42

Репин Л.В., Библин А.М., Вишнякова Н.М., Соколов Н.В., Давыдов А.А.
Проблемы риск-коммуникации: методические подходы к использованию социологических данных в планировании информационной работы с населением по вопросам радиационной безопасности.....50

Храмцов Е.В.
Радиационная обстановка на территории проведения мирного ядерного взрыва «Глобус-1» после выполнения реабилитационных работ58

Шацкий И.Г.
Оценка доз медицинского облучения при рентгено-графических стоматологических исследованиях.....69

Кононенко Д.В., Кормановская Т.А.
Оценка доз облучения населения субъектов Российской Федерации за счет космического излучения78

ОБЗОРЫ

Соснина С.Ф., Сокольников М.Э.
Наследуемые эффекты у потомков, связанные с вредным воздействием на родителей84

САНИТАРНО-ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИЙ НАДЗОР

Самойлов А.С., Романович И.К., Грачев М.И., Саленко Ю.А., Барковский А.Н., Репин В.С., Богданова Л.С.
К вопросу о координации действий сил и средств организаций и учреждений ФМБА России и Роспотребнадзора в чрезвычайных ситуациях радиационного характера.....96

Сапрыкин К.А., Громов А.В., Иванов С.А.
Обеспечение радиационной безопасности при проведении Чемпионата мира по футболу 2018.....106

НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ДОКУМЕНТЫ

Романович И.К.
Ликвидация ядерного и радиационного наследия России: научное обеспечение радиационно-гигиенического нормирования.....114

ЕСКИД И РАДИАЦИОННО-ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ПАСПОРТИЗАЦИЯ

Голиков В.Ю., Чипига Л.А., Водоватов А.В., Сарычева С.С.
Дополнения и изменения в оценке эффективных доз внешнего облучения пациентов при медицинских исследованиях120

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА
«РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА»133

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА Том 12 № 4, 2019

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

Власов О.К., Краевский П., Звонова И.А., Малатова И., Бартускова М., Щукина Н.В., Чекин С.Ю., Туманов К.А.
Верификация радиозоологической модели на инструментальных данных удельной активности ^{131}I в траве в Мазовии и Богемии после аварии на ЧАЭС (по материалам «Пражского» и «Варшавского» сценариев проекта МАГАТЭ EMRAS).....6

Соснина С.Ф., Окотенко П.В., Юркин А.М., Рогачева С.А., Груздева Е.А., Сокольников М.Э.
Лейкомогенный риск и темп накопления радиационной дозы. Сообщение 1: Характеристика исследуемой группы работников производственного объединения «МАЯК»...18

Шлеенкова Е.Н., Голиков В.Ю., Кайдановский Г.Н., Бажин С.Ю., Ильин В.А.
Результаты контроля доз облучения хрусталиков глаз у медицинского персонала г. Санкт-Петербурга29

Рамзаев В.П., Барковский А.Н.
Корреляция между расчетными и измеренными значениями мощности дозы гамма-излучения в воздухе в лесах, загрязненных ^{137}Cs : отдаленный период после Чернобыльской аварии37

Кононенко Д.В.
Использование метода бета-подстановки для анализа цензурированных данных об объемной активности радона в воздухе помещений47

ОБЗОРЫ

Ярмошенко И.В., Малиновский Г.П., Онищенко А.Д., Васильев А.В.
Проблема облучения радоном в зданиях повышенного класса энергоэффективности56

САНИТАРНО-ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИЙ НАДЗОР

Чубирко М.И., Клепиков О.В., Куропат С.А., Кузмичев М.К., Студеникина Е.М.
Оценка мощности эквивалентной дозы гамма-излучения на открытой местности территории города Воронежа66

МНЕНИЕ ЭКСПЕРТА

Архангельская Г.В., Зеленцова С.А.
Пути оптимизации риск-коммуникации специалистов по радиационной безопасности и населения: рекомендации по языку общения.....72

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Хакимова Н.У., Малышева Е.Ю., Шосафарова Ш.Г., Мирсаидов У.М.
Сравнительный анализ внешнего облучения различных профессиональных групп медперсонала г. Душанбе Республики Таджикистан.....78

Варфоломеева К.В.
Кулинарная обработка сушеных грибов как эффективный способ снижения содержания в них цезия-13782

Сарычева С.С.
Измерение поглощенной дозы в коже пациентов, подвергающихся интервенционным исследованиям, с помощью радиоохромных пленок Gafchromic XR-RV389

ЕСКИД И РАДИАЦИОННО-ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ПАСПОРТИЗАЦИЯ

Барковский А.Н., Братилова А.А., Кормановская Т.А., Ахматдинов Руслан Р., Ахматдинов Рустам Р.
Динамика доз облучения населения Российской Федерации за период с 2003 по 2018 г.96

ПЕРЕЧЕНЬ СТАТЕЙ ЗА 2019 ГОД.....123

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА
«РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА»128

JOURNAL OF RADIATION HYGIENE Vol. 12 № 1, 2019

REVIEWS

- Onischenko G.G., Popova A.Yu., Romanovich I.K., Vodovotov 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 exposure21

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 accident34
- Рамзаев В.П., Барковский А.Н.*
Оценка мощности воздушной кермы гамма-излучения ^{137}Cs и ^{134}Cs , выпавших на почву в Сахалинской области России после Фукусимской аварии36

- 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 1950–201560

- Vodovotov 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 tomography113

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 risk126

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

JOURNAL OF RADIATION HYGIENE Vol. 12 № 2, 2019

REVIEWS

- Onischenko G.G., Popova A.Yu., Romanovich I.K., Vodovotov A.V., Bashketova N.S., Istorik O.A., Chipiga L.A., Shatsky I.G., Sarycheva S.S., Biblin A.M., Repin L.V.*
Modern principles of the radiation protection from sources of ionizing radiation in medicine. Part 2: radiation risks and development of the system of radiation protection21

- Mironenko O.V., Baltrukova T.B., Bashketova N.S., Gorskiy G.A., Kryukova T.V., Fedorova E.A.*
Hygienic requirements to the design of the positron-emission tomography centers and departments.....32

- Romanovich I.K., Kormanovskaya T.A., Koroleva N.A., Saprykin K.A.*
Justification of the methodical approaches to the assessment of the doses of the public residing in the zone of influence of the facilities of the nuclear and radiation legacy42

RESEARCH ARTICLES

- Андерссон М., Эккерман К., Павел Д., Олмен А., Маттссон С.*
Улучшенные модели оценки радиационного риска для отдельных когорт пациентов в Швеции.....44

- Golikov V.Yu.*
Method and software for photon dose calculation in phantoms of human body64

- Degteva M.O., Shishkina E.A., Tolstykh E.I., Zalyapin V.I., Sharagin P.A., Smith M.A., Napier B.A.*
Methodological approach to development of dosimetric models of the human skeleton for beta-emitting radionuclides74

- Titov N.V.*
Prospects for the use of the dosimeters with Geiger-Muller counters for the dosimetry of the pulse emission80

- Khrantsov E.V.*
Radiation situation on the territory of the peaceful nuclear explosion «Globus-1» before performing the rehabilitation works87

TRAINING SPECIALISTS BY RADIATION HYGIENE

- Rybnikov V.Yu., Tarita V.A., Rogalev K.K.*
Training of medical personnel of EMERCOM of Russia to respond to the emergency situations of radiation nature using the distance learning.....92

- Kiselev S.M., Marennyy A.M., Romanov V.V.*
Radon. Advanced regulatory approaches to public radiation protection.....100

- ANNIVERSARY103**

- OBITUARY106**

- JOURNAL OF RADIATION HYGIENE – INSTRUCTIONS FOR AUTHORS.....109**

JOURNAL OF RADIATION HYGIENE Vol. 12 № 3, 2019

RESEARCH ARTICLES

Bashkov A.N., Sheykh Zh.V., Voskanyan S.E., Dunaev A.P., Popov M.V., Udalov Yu.D., Samoylov A.S.

Prospects for the reduction of the patient doses based on the optimization of the CT abdomen protocols for the different types of malignancies..... 14

Trapeznikov A.V., Nikolkin V.N., Korzhavin A.V., Trapeznikova V.N.

Radiation-hygienic assessment of the concentration and distribution of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in ichthyofauna of the Ob'-Irtysh river system25

Ramzaev V.P., Barkovsky A.N., Varfolomeeva K.V.

Vertical distribution of ¹³⁷Cs in soddy-podzolic sandy soil in grasslands and forests of the Bryansk region in 2015–201640

Finashov L.V., Vostrotin V.V., Yanov A.Yu.

Tririum in urine in residents of Ozyorsk, the Chelyabinsk region in 2016.....48

Repin L.V., Biblin A.M., Vishnyakova N.M., Sokolov N.V., Davydov A.A.

Problems of risk communication: methodological approaches to the use of sociological data in planning of information work with the population on radiation safety issues56

Khramtsov E.V.

Radiation situation on the territory of the peaceful nuclear explosion «Globus-1» after performing the rehabilitation works.....67

Shatskiy I.G.

Dose assessment of medical exposure of radiographic dental studies76

Kononenko D.V., Kormanovskaya T.A.

Assessment of the doses to the population of the regions of Russia from external exposure to the cosmic radiation.....82

REVIEW

Sosnina S.F., Sokolnikov M.E.

Heritable effects in offspring associated with harmful exposure to parents (Literature review).....93

SANITARY AND EPIDEMIOLOGICAL SURVEILLANCE

Samoilov A.S., Romanovich I.K., Grachev M.I., Salenko Yu.A., Barkovsky A.N., Repin V.S., Bogdanova L.S.

On the issue of coordination of the activities of forces and means of organizations and institutions of the Federal Medical and Biological Agency of Russia and Rospotrebnadzor in emergency situations of a radiation nature..... 104

Saprykin K.A., Gromov A.V., Ivanov S.A.

Ensuring radiation safety at the FIFA World Cup 2018..... 112

STANDART AND METHODICAL DOCUMENTS

Romanovich I.K.

Termination of the nuclear and radiation legacy of Russia: scientific basis for the radiation-hygienic regulation118

ISDCR AND RUSSIAN FEDERATION RADIATION-HYGIENIC PASSPORTIZATION

Golikov V.Yu., Chipiga L.A., Vodovatov A.V., Sarycheva S.S.

Supplements and adjustments to the method of the assessment of the effective dose from the external exposure of the patients131

JOURNAL OF RADIATION HYGIENE – INSTRUCTIONS FOR AUTHORS.....133

JOURNAL OF RADIATION HYGIENE Vol. 12 № 4, 2019

RESEARCH ARTICLES

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

Verification of radioecological models to the instrumental data of the specific activity ¹³¹I in a grass in Mazovia and Bohemia after the Chernobyl accident (from “Prague” and “Warsaw” scenarios of the IAEA project EMRAS)..... 16

Sosnina S.F., Okatenko P.V., Yurkin A.M., Rogacheva S.A., Gruzdeva E.A., Sokolnikov M.E.

Leukemia risk and the pattern of dose accumulation. Part 1: Characteristics of the study group of the Mayak Production Association personnel26

Shleenkova E.N., Golikov V.Yu., Kaidanovsky G.N., Bazhin S.Yu., Ilyin V.A.

Results of eye lens doses control of medical personnel in St. Petersburg.....35

Ramzaev V.P., Barkovsky A.N.

Correlation between calculated and measured values of gamma dose rate in air in forests contaminated with ¹³⁷Cs: the remote period after the Chernobyl accident.... 45

Kononenko D.V.

Application of the β -substitution method for analyzing censored data on indoor radon concentrations 54

REVIEW

Yarmoshenko I.V., Malinovsky G.P., Onishchenko A.D., Vasilyev A.V.

Problem of radon exposure in energy-efficient buildings: a review 64

SANITARY AND EPIDEMIOLOGICAL SURVEILLANCE

Chubirko M.I., Klepikov O.V., Kurolap S.A., Kuzmichev M.K., Studenikina E.M.

Estimation of the equivalent dose rate of gamma radiation in the open territory of the city of Voronezh 70

EXPERT OPINION

Arkhangelskaya G.V., Zelentsova S.A.

Ways to optimize the risk communication between specialists on radiation safety and population: recommendations on communication language 76

BRIEF MESSAGES

Khakimova N.U., Malysheva E.Yu., Shosafarova S.G., Mirsaidov U.M.

Comparative analysis of the external exposure of different professional groups of medical staff of Dushanbe city of the Republic of Tajikistan..... 80

Varfolomeeva K.V.

Cooking of the dried mushrooms as an effective solution for the reduction of the ¹³⁷Cs concentration..... 87

Sarycheva S.S.

Patients skin dose measurements during interventional radiological examinations using Gafchromic XR-RV3 FILM..... 94

ISDCR AND RUSSIAN FEDERATION RADIATION-HYGIENIC PASSPORTIZATION

Barkovsky A.N., Bratilova A.A., Kormanovskaya T.A., Akhmatdinov Ruslan R., Akhmatdinov Rustam R.

Trends in the doses of the population of the Russian Federation in 2003–2018..... 104

LIST OF ARTICLES FOR 2019..... 123

JOURNAL OF RADIATION HYGIENE – INSTRUCTIONS FOR AUTHORS..... 128

Том 12 № 2(спецвыпуск), 2019

ПРЕДИСЛОВИЕ

К 90-летию со дня рождения доктора медицинских наук, профессора, заслуженного деятеля науки Российской Федерации П.В. Рамзаева7

ИЗ ИСТОРИИ ГИГИЕНЫ

Онищенко Г.Г., Звонова И.А., Балонов М.И., Рамзаев В.П., Репин В.С.

Научное наследие профессора Павла Васильевича Рамзаева9

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

Константинов Ю.О.

Защита населения при крупномасштабной радиационной аварии: ослабление негативных социальных последствий защитных мероприятий. Часть 1. Интерпретация дозовых характеристик аварийной ситуации20

Василенко Е.К., Аладова Е.Е., Горелов М.В., Князев В.А., Колупаев Д.Н., Романов С.А.

Авария 1957 года: радиационная обстановка и дозы облучения участников ликвидации аварии на территории промышленной площадки ПО «Маяк»31

Миряхьяев В.М., Тиллобоев Х.И., Назаров Х.М., Махмудова М.М., Мирсаидов У.М.

Содержание изотопов ^{210}Po и ^{210}Pb в воде искусственного озера г. Истиклола Республики Таджикистан и их бионакопление в организме рыб50

Панов А.В., Исамов Н.Н., Кузнецов В.К.

Радиационно-экологический мониторинг в регионе размещения Ростовской АЭС. Анализ результатов многолетних исследований54

Брук Г.Я., Базюкин А.Б., Братилова А.А., Яковлев В.А.

Закономерности формирования и прогноз доз внутреннего облучения населения Российской Федерации и его критических групп в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС66

Нилова Е.К., Бортновский В.Н., Тагай С.А., Дударева Н.В., Жукова Л.В.

^{241}Am на территориях, прилегающих к белорусскому сектору зоны отселения Чернобыльской АЭС: загрязнение почв, продуктов питания и оценка доз внутреннего облучения населения75

ОБЗОРЫ

Шандала Н.К., Киселев С.М., Титов А.В.

Научно-практический опыт надзорной деятельности в области обеспечения защиты населения и окружающей среды на объектах ядерного наследия России83

Маренный А.М., Киселев С.М.

Национальные радоновые программы: опыт реализации и задачи на перспективу97

Vol. 12 № 2(special issue), 2019

FOREWORD

To commemorate the 90th anniversary of the birth of doctor of medical sciences, professor, honored worker of science of the Russian Federation P.V. Ramzaev7

FROM HYGIENE HISTORY

Onischenko G.G., Zvonova I.A., Balonov M.I., Ramzaev V.P., Repin V.S.

Scientific legacy of professor Pavel Vasilyevich Ramzaev17

RESEARCH ARTICLES

Konstantinov Yu.O.

Protection of the public in a large-scale radiation accident: mitigation of negative social consequences of protective actions.

Part 1. Interpretation of dose characteristics of emergency29

Vasilenko E.K., Aladova E.E., Gorelov M.V., Knyazev V.A., Kolupaev D.V., Romanov S.A.

The 1957 accident: radiological situation and radiation doses of participants in the liquidation of the accident on the territory of PA "Mayak" industrial site48

Miryakhyayev V.M., Tilloboev Kh.I., Nazarov Kh.M.,

Makhmudova M.M., Mirsaidov U.M.

^{210}Po and ^{210}Pb Isotopes Content in the Water of Artificial Lake of Istiklol City of the Republic of Tajikistan and their Bioaccumulation in the Fish53

Panov A.V., Isamov N.N., Kuznetsov V.K.

Radioecological monitoring in the vicinity of Rostov NPP. The analysis of results of long-term investigations64

Bruck G.Ya., Bratilova A.A., Bazyukin A.B., Yakovlev V.A.

Trends of development and prediction of the doses from the internal exposure of the public of the Russian Federation and its critical groups in the distant post-Chernobyl NPP accident period73

Nilova E.K., Bortnovsky V.N., Tagai S.A., Dudareva N.V., Zhukova L.V.

^{241}Am on the territories adjacent to the Belarusian sector of the Chernobyl NPP resettlement zone: soil contamination, foodstuffs and population internal dose assessment81

REVIEWS

Shandala N.K., Kiselev S.M., A.V.

Scientific and practical experience of supervisory activities in the field of the public and environmental protection at the Russian nuclear legacy sites94

Marennyy A.M., Kiselev S.M.

The national radon program: Implementation experience and challenges for the future107

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 и официальном сайте журнала «Радиационная гигиена» 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 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. **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. Центер. Международная система единиц (СИ) в атомной науке и технике: Справочное руководство. М.: Энергоиздат, 1981. 200 с.). Все результаты измерений, приводимых в статье, должны быть выражены только в системе СИ.

16. При описании методики исследования можно ограничиться указанием на существо применяемого метода со ссылкой на источник заимствования, в случае модификации – указать, в чем конкретно она заключается. Оригинальный метод должен быть описан полностью.

17. При первом упоминании терминов, неоднократно используемых в статье (однако не в заголовке статьи и не в резюме), необходимо давать их полное наименование и сокращение в скобках, в последующем применять только сокращение, однако их применение должно быть сведено к минимуму. Сокращение проводится по ключевым буквам слов в русском написании, например: источник ионизирующего излучения (ИИИ) и т. д. Тип приборов, установок следует вводить на языке оригинала, в кавычках; с указанием (в скобках) страны-производителя. Например: использовали спектрофотометр «СФ-16» (Россия), спектрофлуориметр фирмы «Hitachi» (Япония). Малоупотребительные и узкоспециальные термины также должны быть расшифрованы.

18. Таблицы должны содержать только необходимые данные и представлять собой обобщенные и статистически обработанные материалы. Каждая таблица снабжается заголовком и вставляется в текст сразу после ссылки на нее.

19. Иллюстрации должны быть четкие, контрастные. Цифровые версии иллюстраций должны быть сохранены в отдельных файлах в формате Tiff, с разрешением 300 dpi и последовательно пронумерованы. 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.)]. Илисогласно 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 YY, David S, Rasmus D, Gerdts 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 транслитерируется. 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 neimunnykh 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.