

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

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

ТОМ 13 № 3, 2020



**Научно-практический
журнал**

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

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-28716 от 6 июля 2007 г.

В 2015 году журнал был зарегистрирован как сетевое издание Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации
ЭЛ № ФС77-63702 от 10 ноября 2015 г.

Издается ежеквартально.

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

Ссылка на журнал «РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА» обязательна.

Журнал включен в перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук. Журнал индексируется в мультидисциплинарной библиографической и реферативной базе SCOPUS, Российском индексе научного цитирования (РИНЦ).

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

Адрес редакции:
197101, Санкт-Петербург,
ул. Мира, дом 8
Тел. (812) 233-4283, 233-5016
Тел./Факс (812) 233-4283
E-mail: journal@niirg.ru
Сайт: www.radhyg.ru

Тираж 200 экз.



Индекс для подписки в агентстве
«Роспечать» – **57988**

© «Радиационная гигиена», 2020

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

RADIATIONNAYA GYGIENA

Председатель редакционного совета
Г.Г. Онищенко

Главный редактор
И.К. Романович



Том 13 № 3, 2020

Председатель редакционного совета

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

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Редакционный совет

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)

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

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

Ермолина Елена Павловна — ФГБОУ ДПО Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования Министерства здравоохранения Российской Федерации (Москва, Российская Федерация)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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. 13 № 3, 2020

Chairman of Editorial Council

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

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

Members of Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial Board

Aleksandr V. 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-Russian 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)

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

Sergey V. Grebenkov — Northwest State Medical University after I.I. Mechnikov, M.D., Professor (Saint Petersburg, Russian Federation)

Elena P. Ermolina — Federal State Budgetary Educational Institution of Further Professional Education «Russian Medical Academy of Continuous Professional Education» of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation (Moscow, Russian Federation)

Irina A. Zvonova — Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Doctor of Engineering (Saint Petersburg, Russian Federation)

Marina V. Kaduka — Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Candidate of biological science (Saint Petersburg, Russian Federation)

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Том 13 № 3, 2020

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

Л.Ю. Крестинина, С.С. Силкин, Л.Д. Микрюкова, С.Б. Епифанова,
А.В. Аклев

Риск заболеваемости солидными злокачественными
новообразованиями в Уральской когорте аварийно-облученного
населения: 1956–2017 6

Г.В. Жунтова, Т.В. Азизова, М.В. Банникова, Т.П. Заварухина

Динамика показателей заболеваемости раком толстого
кишечника в когорте работников, подвергшихся
профессиональному облучению 18

Е.К. Нилова, В.Н. Бортовский, С.А. Тагай, Н.В. Дударева,
А.Н. Никитин

Оценка современных уровней ^{241}Am и ^{137}Cs в почве,
продуктах питания, доз внутреннего облучения жителей
населенных пунктов, прилегающих к зоне отселения
Чернобыльской АЭС (на примере Брагинского района
Гомельской области Беларуси) 25

А.В. Панов, А.В. Трапезников, Н.Н. Исамов, А.В. Коржавин,
В.К. Кузнецов, И.В. Гешель

Оценка влияния эксплуатации реактора БН-800
на содержание радионуклидов в местных продуктах
питания района Белоярской АЭС 38

А.М. Маренный, Д.В. Кононенко, А.Е. Труфанова

Радоновое обследование в Челябинской области
в 2008–2011 гг. Анализ территориальной
вариабельности объемной активности радона 51

В.А. Яковлев, Г.Я. Брук

Новые методические приемы оценки прогнозируемых
доз внутреннего облучения населения Брянской области
в отдаленный период после аварии
на Чернобыльской АЭС 68

С.С. Сарычева

Оценка дозовых параметров, определяющих вероятность
возникновения детерминированных эффектов
в коже пациентов, подвергающихся интервенционным
рентгенологическим исследованиям 77

САНИТАРНО-ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИЙ НАДЗОР

Т.А. Кормановская, И.К. Романович, К.А. Сапрыкин, Н.Е. Вяльцина,
С.В. Гаевой, В.Ю. Коновалов, Л.В. Бондарь

Обеспечение радиационной безопасности населения
восточных районов Оренбургской области при
использовании питьевой воды
из подземных источников водоснабжения 87

ОБЗОРЫ

И.А. Звонова

Дозы внутреннего облучения у населения
префектуры Фукусима вследствие аварии
на АЭС Фукусима-Дайичи 98

С.А. Кальницкий, Е.Р. Ладанова

Риск, уровни облучения и меры радиационной
защиты молочной железы у женщин при проведении
рентгенографических процедур 110

ДИСКУССИИ

М.В. Калинина, Т.В. Жукова

Методические аспекты обоснования контрольных
диагностических уровней облучения пациентов
при медицинских рентгенодиагностических
исследованиях 123

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Ю.И. Стёпкин, М.И. Чубирко, М.К. Кузмичев, О.В. Клепиков,
С.А. Епринцев

Обзор радиационных инцидентов на территории
Воронежской области 131

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА

«РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА» 136

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА Том 13 № 3, 2020

CONTENTS

Vol. 13 № 3, 2020

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

L. Yu. Krestinina, S.S. Silkin, L.D. Mikryukova, S.B. Epifanova,
A.V. Akleyev

Solid cancer incidence risk in the Ural cohort
of the accidentally exposed population: 1956–2017 16

G.V. Zhuntova, T.V. Azizova, M.V. Bannikova, T.P. Zavarukhina

Incidence trend for colorectal cancer in the cohort
of workers exposed to ionizing radiation 23

E.K. Nilova, V.N. Bortnovsky, S.A. Tagai, N.V. Dudareva,
A.N. Nikitin

Assessment of the current levels of ^{241}Am and ^{137}Cs in soils
and foodstuff, as well as of public internal exposure to ionizing
radiation in populated areas adjacent to the Chernobyl
NPP exclusion zone (case study: the Bragin district
of the Gomel region, Belarus) 36

A.V. Panov, A.V. Trapeznikov, N.N. Isamov, A.V. Korzhavin,
V.K. Kuznetsov, I.V. Geshel

Assessment of the impact of the BN-800 reactor
operation on the radionuclides content in local foodstuffs
in the vicinity of Beloyarsk NPP 49

A.M. Marennyy, D.V. Kononenko, A.E. Trufanova

Radon survey in Chelyabinsk Oblast, Russia,
in 2008–2011. Analysis of spatial variability of indoor
radon concentration 65

V.A. Yakovlev, G.Ya. Bruk

A new approach for the methodology of the assessment
of the predicted doses to the public of the Bryansk region
in the remote period after the Chernobyl NPP accident 75

S.S. Sarycheva

Evaluation of dose parameters defining the probability
of deterministic effects in the skin of patients undergoing
interventional radiological examinations 85

SANITARY AND EPIDEMIOLOGICAL SURVEILLANCE

T.A. Kormanovskaya, I.K. Romanovich, K.A. Saprykin, N.E. Vyaltina,
S.V. Gaevoy, V.Yu. Konovalov, L.V. Bondar

Provision of the radiation safety of the public of the eastern
districts of the Orenburg region for the use of the drinking
water from the underground water supply sources 96

REVIEWS

I.A. Zvonova

Internal doses to the public in the Fukushima prefecture
from the Fukushima Daiichi NPP accident 107

S.A. Kalnitsky, E.R. Ladanova

Exposure of the breast, corresponding radiation risks
and radiation protection for women, undergoing
conventional X-ray examinations 121

DISCUSSIONS

M.V. Kalinina, T.V. Zhukova

Methodological aspects of the justification of control
diagnostic levels of patient exposure in medical X-ray
examinations 129

BRIEF MESSAGES

Yu.I. Stepin, M.I. Chubirko, M.K. Kuzmichev, O.V. Klepikov, S.A. Eprintsev

Review of radiation incidents in the territory
of the Voronezh region 134

JOURNAL OF RADIATION HYGIENE –

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS 136

Vol. 13 № 3, 2020 RADIATION HYGIENE

Риск заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями в Уральской когорте аварийно-облученного населения: 1956–2017

Л.Ю. Крестинина, С.С. Силкин, Л.Д. Микрюкова, С.Б. Епифанова, А.В. Аксеев

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

До настоящего времени изучение последствий хронического облучения населения Южного Урала проводилось в двух отдельных когортах — в когорте реки Течи и в когорте облученных на Восточно-Уральском радиоактивном следе. В 2019 г. была сформирована Уральская когорта аварийно-облученного населения, объединяющая население, облученное в двух радиационных ситуациях на Южном Урале в 1950-е гг. Численность объединенной когорты для анализа заболеваемости злокачественными новообразованиями составила около 60 тысяч человек, период наблюдения был расширен по 2017 г., число солидных злокачественных новообразований составило 4537, а число человеко-лет 1 283 267, что почти в 3 раза больше, чем при анализе последствий облучения в каждой из двух радиационных ситуаций отдельно. В анализе заболеваемости всеми солидными злокачественными новообразованиями использована доза, накопленная в стенках желудка, которая соответствует дозе, накопленной в большинстве органов и тканей, за исключением костной ткани и красного костного мозга. Средняя доза на желудок, аккумулятивная за весь период наблюдения, для членов когорты составила 38 мГр, максимальная — 1,13 Гр. В статье представлены первые результаты анализа риска заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями в объединенной когорте, которые показывают статистически значимую дозовую зависимость заболеваемости при хроническом облучении в диапазоне малых и средних доз. Величина избыточного относительного риска 0,075/100 мГр (95% ДИ 0,039–0,113), усредненная по полу и возрасту, сопоставима с исследованиями в японской когорте переживших атомную бомбардировку. Статистически значимый избыточный относительный риск 0,047/100 мГр, полученный отдельно для мужчин, хорошо сопоставим с таковым в профессиональных когортах мужского состава — в когорте ликвидаторов Чернобыльской аварии, когорте профессиональных работников трех стран (Великобритания, Франция, США). Сформированная когорта с длительным периодом наблюдения обладает большим потенциалом для будущих более детальных исследований влияния радиационных и нерадиационных факторов на здоровье населения.

Ключевые слова: солидные ЗНО, избыточный относительный риск, ИОР заболеваемости, Уральская когорта аварийно-облученного населения, хроническое облучение.

Введение

В результате деятельности ПО «Маяк» в 1950-х гг. произошло два крупных радиационных события (загрязнение реки Течи радиоактивными отходами и тепловой взрыв в хранилище радиоактивных отходов в сентябре 1957 г.), приведших к хроническому облучению части жителей Южного Урала [1, 2]. Основными дозообразующими радионуклидами явились долгоживущие стронций-90 и цезий-137 [1–3]. В комплексе защитных мероприятий проводилось переселение части населения (из наиболее загрязненных населенных пунктов) на чистые территории (на реке Тече в период с 1956 по 1960 г., а на ВУРСе с октября 1957 по 1959 г.) [1–2].

Исследования отдаленных последствий облучения населения вследствие радиационных инцидентов, произошедших на Южном Урале в 1950-х гг., в Уральском научно-практическом центре радиационной медицины ФМБА России (УНПЦ РМ) проводятся, начиная с 1960-х гг. [1, 2, 4–6].

В первые годы исследования носили выборочный характер, а в конце 1960-х гг. в институте была сформирована когорта лиц, облученных в прибрежных селах реки Течи, численностью около 30 тысяч человек [5, 6]. Население прибрежных сел подверглось хроническому сочетанному (внешнему и внутреннему) облучению. Кумулятивная доза на органы и ткани членов когорты реки

Крестинина Людмила Юрьевна

Уральский научно-практический центр радиационной медицины ФМБА России

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

Течи (КРТ) достигала 1 Гр, а доза на красный костный мозг (ККМ), по последним данным, у 10% составила от 2 до 9 Гр [3]. Первые исследования показали тенденцию, а последующие работы выявили статистически значимое повышение риска онкологической заболеваемости и смертности у членов КРТ [1, 2, 4–9].

В конце 1990-х гг. в УНПЦ РМ была сформирована когорта жителей Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС), сформированного в результате теплового взрыва в хранилище радиоактивных отходов в 1957 г. Доза, полученная данным населением, была ниже таковой на реке Тече, и первые исследования не выявили дозовой зависимости онкологической смертности у жителей ВУРСа [2, 4, 10, 11]. Исследования последнего десятилетия показывают положительный дозовый эффект и у членов этой когорты ВУРСа (КВУРС) [12–14].

За прошедшие годы в УНПЦ РМ были достигнуты значительные успехи в улучшении оценок индивидуальных доз на основе единой дозиметрической системы TRDS-2016, выработаны единые методы наблюдения за членами КРТ и КВУРСа, улучшено качество и полнота данных о заболеваемости и смертности наблюдаемого населения, что явилось предпосылкой для объединения облученных лиц в единую когорту. В 2018–2019 гг. была сформирована когорта, объединяющая все население, облученное в период с 1950 по 1960 г. на Южном Урале в результате двух указанных радиационных событий [15], численностью более 60 тысяч человек, получившая название Уральская когорта аварийно-облученного населения (УКАОН), а в английской аббревиатуре South Urals population exposed to radiation (SUPER). Увеличение численности когорты и периода наблюдения до 62 лет позволило увеличить статистическую силу исследования отдаленных медицинских эффектов облучения в диапазоне низких или средних доз и провести в будущем детальный анализ дозовой зависимости по отдельным параметрам.

Цель исследования – оценка риска заболеваемости всеми солидными злокачественными новообразованиями (ЗНО) в Уральской когорте аварийно-облученного населения.

Материалы и методы

Определение когорты

Уральская когорта аварийно-облученного населения (УКАОН) включает в себя лиц, облученных на Южном Урале на территории Челябинской и Курганской областей в период с 01.01.1950 г. по 31.12.1960 г. в результате двух радиационных ситуаций и проживавших в одном из 41 прибрежного сел реки Течи или 34 населенных пунктов на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа [15].

Объединенная когорта включает не только членов КРТ и КВУРС, родившихся до начала облучения, но также и их потомков (включая облученных внутриутробно), которые проживали вместе с родителями на указанной территории в период максимального радиационного воздействия [15].

Численность когорты, сформированной в 2019 г., составила более 63 тысяч человек, отвечающих критериям формирования когорты, включая 1% лиц, которые имели неполную или противоречивую информацию о датах или

местах проживания, не позволяющую рассчитать для них дозы и включить их в анализ. Работа по уточнению информации продолжается, поэтому незначительные изменения численности аналитической когорты могут иметь место. По данным на март 2020 г., численность УКАОН составила 62 940 человек. Особенности когорты для анализа онкологической заболеваемости представлены ниже.

Критерии исключения из анализа заболеваемости

При подготовке данных к анализу проводится выбор их соответствия определенным критериям качества и принимаются необходимые ограничения. В нашем случае ограничения были связаны с территорией и периодом наблюдения, доступными для систематического сбора информации о заболеваемости ЗНО в интервале лет от начала облучения до настоящего времени, а также с доступностью информации об истории проживания в течение всего периода наблюдения.

Ограничения по периоду наблюдения

Официальная регистрация случаев заболеваемости ЗНО в Челябинской области была начата только с 1956 г., поэтому из УКАОН численностью 62 940 человек были исключены 3125 членов когорты, выбывшие до 1956 г. (до начала наблюдения за заболеваемостью). Исключения были по следующим причинам:

- 2175 человек – умерли до 01.01.1956 г.;
- 40 человек заболели ЗНО до начала наблюдения за заболеваемостью;
- 910 членов когорты выбыли до 01.01.1956 г. (мигрировали или были потеряны на территории наблюдения за заболеваемостью).

Таким образом, в когорте осталось 59 815 человек, основные характеристики представлены в таблице 1.

Таблица 1

Демографические характеристики УКАОН для анализа раковой заболеваемости

[Table 1

Demographic characteristics of the SUPER cohort for cancer incidence analysis]

Параметры [Parameters]	Человек [Persons]	%
Мужчины [Male]	26 522	44
Женщины [Female]	33 293	56
Славяне [Slavs]	42 781	72
Татары и башкиры [Tatars and Bashkirs]	17 034	28
Возраст на момент облучения [Age at exposure]		
0–19	31 584	53
20–39	16 114	27
40–59	8385	14
60>	3732	6
Причина облучения [Reason of exposure]		
Только река Теча [Only the Techa River]	37 827	63
Только ВУРС [Only EURT]	19 921	33
Облучены на реке Тече и на ВУРС [Exposed on the Techa River and on EURT]	2067	4

Окончание таблицы 1

Параметры [Parameters]	Человек [Persons]	%
Область проживания на начало облучения [Residence area at the beginning of exposure]		
Челябинская [Chelyabinsk oblast]	46 138	77
Курганская [Kurgan oblast]	13 677	23
Факт переселения [Resettlement fact]		
Переселенные [Resettled]	21 148	35
Непереселенные [Residents]	38 667	65
Всего [Total]	59 815	100

Что характерно для послевоенного периода, в когорте преобладали женщины (56%). Этнический состав, отражающий популяцию Южного Урала, почти на треть (28%) представлен татарами и башкирами, 72% составляет славянская группа (преимущественно русское население), представители других национальностей составляют менее 1%. Возрастная группа до 20 лет на начало облучения составила 53% от всей когорты, что обусловлено сокращением доли мужчин, рожденных до 1923 г., погибших во время Великой Отечественной войны. Большая доля членов когорты (67%) получила облучение при проживании на реке Тече, из них 4% были облучены в обеих радиационных ситуациях, 33% членов когорты получили облучение при проживании только на ВУРСе.

Часть членов когорты к началу облучения проживала в прибрежных селах реки Течи в Курганской области (23%), остальные члены УКАОН на начало облучения проживали в Челябинской области (77%). Вся когорта в 1950-е гг. была представлена сельским населением, связанным со своим хозяйством, редко менявшим место жительства. Облучение явилось фактором, приведшим к официальному переселению 35% членов когорты, проживавших в наиболее загрязненных населенных пунктах в период с 1956 по 1959 г. Переселение проводилось в пределах административных районов, где проживали данные люди. Небольшое количество людей переезжало самостоя-

тельно на новые места, могло уехать в более удаленные районы и потеряться из наблюдения. Социальные преобразования в стране, процессы индустриализации и развитие системы образования привели к постепенному нарастанию процессов миграции, особенно молодого населения, начиная с 1960-х гг. (когда сельскому населению начали выдавать паспорта). Наиболее выражено это было в 1990-е гг. Данные процессы коснулись и членов наблюдаемой когорты, что привело к необходимости учитывать данный факт при анализе отдаленных эффектов.

Ограничения по территории наблюдения за заболеваемостью

Систематический сбор информации о случаях ЗНО за весь период наблюдения в УНПЦ РМ был доступен только на территории 5 районов Челябинской области, по которым протекала река Теча, включая 2 района на территории ВУРСа, г. Челябинск и г. Озерск. Эта территория была выделена как территория наблюдения за онкологической заболеваемостью (ТНЗ). Исключение остальных территорий Челябинской области и всей Курганской области из ТНЗ связано с отсутствием информации о ЗНО за отдельные годы. Таким образом, для исключения ошибок, связанных с «эпидемиологическим отбором данных», в анализе заболеваемости за весь период наблюдения (с 01.01.1956 по 31.12.2017 г.) используются человеко-годы и случаи ЗНО, зарегистрированные у членов УКАОН только во время проживания на ТНЗ, независимо от наличия информации о случаях ЗНО, зарегистрированных на другой территории у части членов когорты. Наличие истории проживания на каждого члена когорты за весь период наблюдения позволило это сделать.

В таблице 2 представлен жизненный статус членов когорты на конец 2017 г. и распределение среди них случаев ЗНО, включенных в анализ, зарегистрированных во время проживания членов когорты на ТНЗ в период с 1956 по 2017 г. Необходимо подчеркнуть, что это распределение показано на конкретную точку времени (31.12.2017 г.), а срез на более раннюю дату будет отличаться не только числом живых и умерших лиц, но также и числом

Таблица 2

Жизненный статус членов аналитической УКАОН к 31.12.2017 г.

[Table 2]

Vital status for the analytical SUPER cohort as of 31 December 2017]

Жизненный статус на 31.12.2017 г. [Vital status as of 31.12.2017]	Человек [Persons]	%	Случаи [Cases]	%
Живы, проживают на ТНЗ [Alive, living in ICA*]	8721	24	578	13
Умершие на ТНЗ за 1956–2017 гг. [Dead in ICA for 1956–2017]:	22 533	63	3874	86
причина смерти известна [known cause of death]	20 574	91	3773	97
причина смерти не известна [unknown cause of death]	1959	9	101	3
Потерянные [Lost to follow-up]	4443	12	43	1
Всего на ТНЗ [Total in ICA]	35 697	100	4495	100
Покинули ТНЗ [Left the ICA]	24 118	40	42	1
Всего [Total]	59 815	100	4537	100

[*ICA- incidence catchment area]

людей, выехавших с территории и/или потерянных из наблюдения.

По таблице 2 можно видеть, что к концу 2017 г. члены когорты, не проживавшие на ТНЗ (облученные в Курганской области) или выехавшие за пределы ТНЗ, составили 40%. Из проживавших на ТНЗ за весь период умерло около 22,5 тысячи человек, что составляет 63% от численности когорты при исключении мигрантов, и только около 9 тысяч человек были живы и проживали на ТНЗ в 2017 г. Потерянные на территории наблюдения составили 12%. Причина смерти официально документирована у 91% умерших, что является удовлетворительным показателем для анализа.

Число случаев ЗНО, зарегистрированных на ТНЗ и включенных в анализ, составило 4537. По таблице 2 видно, что 43 ЗНО указано среди потерянных на ТНЗ и 42 ЗНО среди не проживающих на ТНЗ к концу 2017 г. Это значит, что случай ЗНО был зарегистрирован у этих членов когорты в период до 31.12.2017 г., когда они проживали на ТНЗ.

Характеристика случаев ЗНО

Источники информации и верификация солидных ЗНО

Основным источником информации о случае ЗНО является извещение о впервые выявленном случае ЗНО из Челябинского областного онкологического диспансера, данные о котором мы имеем для 76% случаев заболеваний, а также медицинское свидетельство о смерти с диагнозом ЗНО из Челябинского ЗАГСа (около 19%). Для 5% случаев ЗНО мы имеем информацию из документов медицинских учреждений (клиника УНПЦ РМ – около 3%, врачебно-трудовая экспертиза и экспертные советы – 2%). Из общего числа солидных ЗНО 60% случаев име-

ют более одного медицинского источника информации. Среди 5% случаев ЗНО, в которых основным источником явились медицинские учреждения, около 70% имеют подтверждение из двух и более медицинских учреждений. Только посмертные диагнозы случаев ЗНО более характерны для первых десятилетий наблюдения, на которые могли не сохраниться архивные данные о заболеваемости. В таких случаях датой диагноза считается дата смерти. Морфологическое, цитологическое или лабораторно-инструментальное подтверждение имеют 66% диагнозов ЗНО, для 16% мы имеем клинические заключения о диагнозах, около 19% диагнозов выставлены только на основании причин смерти. Если рассмотреть верификацию диагнозов с 1990 г., то морфологическое, цитологическое или лабораторно-инструментальное подтверждение имеют более 84%, клиническое – около 7%, на основе посмертных диагнозов – 9%.

Структура солидных ЗНО

В текущем исследовании для лучшей сопоставимости результатов при сравнении с другими исследованиями в анализ риска заболеваемости солидными ЗНО не были включены немеланомные раки кожи, т.к. эти случаи могут сниматься с учета при 5-летней ремиссии, многие международные раковые регистры их исключают. В случае, если у человека с ЗНО кожи наблюдался первичный рак другой локализации, то ЗНО другой локализации включалось в анализ. Структура заболеваемости представлена в таблице 3. Можно отметить, что ранговое распределение случаев ЗНО по локализациям в данной когорте не имело значимых различий от такового в отдельных когортах реки Течи и ВУРСа.

Распределение числа случаев заболеваний ЗНО в аналитической УКАОН по полу и рубрикам МКБ-9*

Таблица 3

[Table 3]

Solid cancer incidence distribution in the analytical SUPER cohort by sex and ICD-9 codes]

Локализация (МКБ-9) [Cancer sites (ICD-9 codes)]	Мужчины [male]	Женщины [female]	Всего [Total]	
	n	n	n	%
Ротовая полость (140–149) [Oral cavity]	155	59	214	5
Пищевод (150) [Esophagus]	115	106	221	5
Желудок (151) [Stomach]	388	338	726	16
Толстый кишечник (153) [Colon]	83	131	214	5
Прямая кишка (154) [Rectum]	118	115	233	5
Печень (155) [Liver]	50	50	100	2
Поджелудочная железа (157) [Pancreas]	66	48	114	3
Другие и неуточненные органы пищеварения (152, 156, 158–159) [Other sites of the digestive organs]	35	65	100	2
Бронхи, легкие (162) [Bronchus, lung]	682	124	806	18
Глотка, трахея, плевра, средостение и неопределенные локализации дыхательной системы (160, 161, 163–165) [Pharynx, trachea, pleura, mediastinum and uncertain localization of the respiratory system]	72	13	85	2
Кости (170), мышечная и соединительная ткань (171) [Bones, muscle and connective tissue]	25	30	55	1
Меланома (172) [Melanoma]	18	28	46	1
Молочная железа (174, 175) [Breast]	3	327	330	7

Локализация (МКБ-9) [Cancer sites (ICD-9 codes)]	Мужчины [male]	Женщины [female]	Всего [Total]	
	n	n	n	%
Шейка матки (180) [Cervix]	0	279	279	6
Тело матки и неуточн. матки (179, 182) [Body and unspecified uterus]	0	168	168	4
Яичник, другие женские половые органы (183-184) 181 [Ovary, other female genitals]	0	139	139	3
Простата, другие мужские половые органы (185, 186, 187) [Prostate, other male genital organs]	152	0	152	3
Мочевой пузырь (188) [Bladder]	82	15	97	2
Почки (189) [Kidney]	79	61	140	3
Глаза (190) и нервная система (191–192, 239.6) [Eyes and nervous system]	43	48	91	2
Щитовидная железа (193) [Thyroid]	13	58	71	2
Неопределенная локализация (194–199) [Not specified sites]	73	83	156	3
Все солидные ЗНО (140–199, 239.6) исключая 173 [All solid, excluding 173]	2252	2285	4537	100

* МКБ-9 – Международная классификация болезней 9 пересмотра [ICD-9 – International classification of diseases, 9 revision].

Наиболее частыми локализациями ЗНО для всех членов когорты обоего пола за 62-летний период явились ЗНО легких, желудка и молочной железы (в порядке убывания). Ранговое распределение самых частых ЗНО у мужчин: ЗНО легких (682 случая), желудка (388) и ротовой полости (155), ЗНО простаты (152). У женщин наиболее частыми являются ЗНО желудка (338), на втором месте – ЗНО молочной железы (327) и на третьем – ЗНО шейки матки (279).

Дозы облучения

Характеристика облучения населения является важным фактором, необходимым для оценки отдаленных эффектов облучения и расчета рисков. Оценка дозы у населения является очень трудоемкой задачей с необходимостью учитывать множество факторов загрязнения окружающей среды (на реке Теча и на ВУРСе), изменяющихся в динамике лет, а также факторов, влияющих на накопление радионуклидов в различных органах человека, изменяющихся во времени и зависящих от половозрастных характеристик, особенностей поведения населения и других факторов. Многолетними усилиями сотрудников биофизической лаборатории УНПЦ РМ была создана дозиметрическая система, которая позволяет рассчитывать индивидуализированные дозы на каждого члена когорты, учитывая особенности облучения на реке Тече и на ВУРСе. Дозиметрическая система постоянно совершенствуется и детально описана в работах дозиметристов [6, 16]. Данное исследование проведено с использованием индивидуализированных доз, рассчитанных по системе TRDS-2016. Для анализа риска солидных ЗНО использована доза, поглощенная в стенках желудка, которая близка к дозам для большинства других органов. Как отмечалось, желудок

являлся одной из самых распространенных локализаций ЗНО. Доза включает в себя компоненту внутреннего и внешнего облучения и рассчитана на каждый год.

Финальные результаты анализа рисков базируются на расчетах с использованием 5-летнего латентного периода, необходимого для реализации ЗНО после воздействия излучения, т.е. случай ЗНО у человека сопоставляется с дозой, полученной за 5 лет до установления диагноза. На рисунке 1 представлено распределение членов когорты в зависимости от дозы на желудок, накопленной к концу 2017 г. Можно видеть, что 90% членов когорты получили облучение в пределах малых доз – до 100 мГр, 9% получили дозу от 100 до 500 мГр и только 1% от всех членов когорты получили дозы свыше 500 мГр. Максимальная доза, накопленная в стенках желудка за весь период наблюдения у членов когорты, достигала 1,13 Гр, средняя – 38 мГр, медианная доза была меньше и составляла 11 мГр.

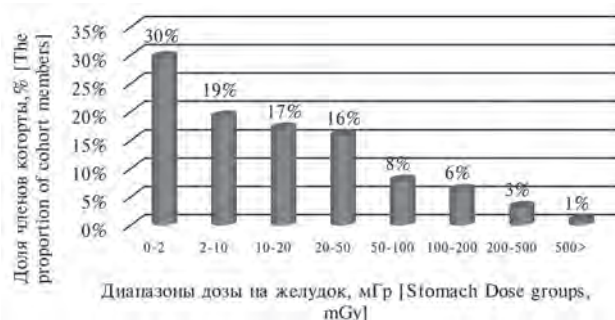


Рис. 1. Распределение членов аналитической УКАОН по дозовым группам
[Fig. 1. Distribution of the analytical SUPER cohort members by dose groups]

Методы анализа

Анализ проводился на основе статистического пакета EPICURE (программы AMFIT, DATAB) [17] с использованием регрессионного анализа простой параметрической модели избыточного относительного риска (ИОР).

Модель позволяет оценить влияние на величину риска как радиационных, так и нерадиационных факторов, а также сравнить разные виды зависимости заболеваемости от дозы (в нашем случае оценивалась линейная, квадратичная и линейно-квадратичная зависимости).

Модель имела вид:

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

где $\lambda(a, d, z)$ – общий риск заболеваемости ЗНО в зависимости от достигнутого возраста (a), дозы (d) и других факторов (z);

λ_0 – базовый уровень риска, z_0 – другие факторы, которые могут влиять на базовые уровни;

z_1 – факторы, которые могут модифицировать ИОР.

Избыточный риск представлен как произведение функции дозового ответа $\rho(d)$ на функцию модификации эффекта ($\varepsilon(z_1)$).

На первом этапе анализа с помощью программы DATAB формируется файл данных, который преобразует все данные в формат таблиц, в которых все случаи и человеко-годы распределяются по стратам. В нашем анализе была проведена стратификация по следующим параметрам: пол (2 категории), национальность (2 категории: славяне; татары и башкиры), возраст начала облучения (8 категорий по 10 лет от 0 до 60 лет и старше), достигнутый возраст (9 категорий с началом в 0, 1, 10, 20, 40, 50, 60, 70, 80 и старше лет), факт эвакуации (2 категории), территория наблюдения (6 категорий), календарный период наблюдения (12 категорий по 5 лет, начиная с 1.1.1956 г. по 1.1.2011–2017 гг.), дозовые категории по дозе на желудок (8 категорий с начальными дозами 0; 0,002; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5) для каждого из латентных периодов (0, 2, 5, 10, 15 лет).

Данные страты были использованы для создания файла данных, который в дальнейшем использовался при анализе. Во время проведения анализа имеется возможность дополнительно создавать категории с более крупными интервалами страт для указанных параметров, например для периодов наблюдения, дозовых категорий

и др. Метод максимального правдоподобия был использован для оценки статистической значимости параметров и их доверительных интервалов. Значимость оценивалась с 95% вероятностью.

Результаты и обсуждение

Оценка базовых уровней заболеваемости солидными ЗНО

При анализе зависимости базовых уровней заболеваемости от нерадиационных факторов в модель включались в различных сочетаниях следующие параметры: пол, национальность, факт эвакуации, период наблюдения (в различных сочетаниях по 2 периода, 3 периода, по 10-летним периодам), год рождения когорты (до 1931 г. и после), половозрастная зависимость в виде логарифма достигнутого возраста и квадрата логарифма достигнутого возраста. Поскольку большинство параметров (кроме пола и национальности) имели зависимость от времени, то их значимость могла меняться в зависимости от их сочетания.

В результате анализа было получено наиболее значимое влияние параметров на уровень заболеваемости ЗНО в следующем сочетании: пол ($p < 0,001$), национальность ($p < 0,001$), 7 десятилетних календарных периодов наблюдения (от $p < 0,001$ до $p < 0,02$), год рождения когорты ($p < 0,001$), логарифм достигнутого возраста для женщин ($p < 0,001$), логарифм достигнутого возраста для мужчин ($p < 0,001$), квадрат логарифма достигнутого возраста для женщин ($p < 0,04$) и квадрат логарифма достигнутого возраста для мужчин ($p < 0,02$).

При этом качественные различия базовых зависимостей заключались в следующем: показатель у мужчин – выше, чем у женщин, у славян – выше, чем у татар и башкир, с течением времени показатели снижались относительно первого десятилетия, с возрастом показатели увеличивались: у рожденных до 1931 г. (при одновременном учете влияния возраста) показатели были ниже, чем у рожденных после 1931 г.

Оценка дозовой зависимости

При добавлении в модель дозовой компоненты значимость влияния показателей базовой модели осталась в пределах значимости ($p < 0,04$ или меньше).

Были получены оценки радиационного риска в формате ИОР для разных латентных периодов линейной зависимости. В таблице 4 представлены результаты анализа при разных латентных периодах.

Таблица 4

Величины ИОР заболеваемости ЗНО в зависимости от латентного периода

[Table 4]

ERR values and excess cancer cases depending on the latent period]				
Латентный период, лет [Latent period, years]	ИОР/100мГр [ERR/100 mGy]	P	Доверительный интервал, 95% [Confidence interval]	
			нижний [lower]	верхний [upper]
0	0,075	<0,001	0,040	0,112
2	0,075	<0,001	0,040	0,113
5	0,075	<0,001	0,039	0,113
10	0,070	<0,001	0,035	0,109
15	0,070	<0,001	0,033	0,110

Можно видеть, что при всех латентных периодах наблюдается высокая статистическая значимость ($p < 0,001$) величины ИОР. Судя по минимальным различиям, показатели риска начинают снижаться при использовании латентного периода в 10 и 15 лет.

Для первых трех вариантов (0, 2 и 5 лет) минимального латентного периода величина риска и показатель отклонения модели практически не отличаются (ИОР = 0,075/100 мГр), и использование латентного периода в 2 года правомерно использовать, как и период в 5 лет. Для лучшего сопоставления с предыдущими исследованиями мы решили использовать минимальный латентный период в 5 лет.

Чтобы определить вид дозовой зависимости, нами были протестированы линейно-квадратичная и квадратичная модели зависимости. Добавление квадратичной компоненты к линейной не привело к улучшению подгонки данных ($p > 0,5$).

Модель квадратичной зависимости от дозы была протестирована с использованием 5-летнего латентного периода и тех же параметров, от которых зависели базовые уровни заболеваемости (пол, национальность, 7 десятилетних календарных периодов, год рождения когорты до 1931 г. и после, поло-специфичная логарифмическая зависимость от возраста и квадратичная поло-специфичная логарифмическая зависимость от возраста). Был получен высоко значимый ($p = 0,001$) ИОР = 0,13/100мГр; 95% ДИ: 0,06–0,21, однако показатель отклонения модели было несколько больше, чем при линейной зависимости (17461,2 в сравнении с 17455,9). На рисунке 2 представлен график линейной, квадратичной зависимости и непараметрические значения ИОР в дозовых группах.

Можно видеть, что непараметрические значения ИОР в дозовых группах практически лежат на графике линейной зависимости. Также по рисунку 2 можно видеть, что непараметрические значения ИОР становятся значимыми при дозах свыше 100 мГр, а при дозах ниже 100 мГр нижняя граница доверительного интервала в них имеет отрицательные значения, указывая на наличие неопределенности результатов при низких дозах.

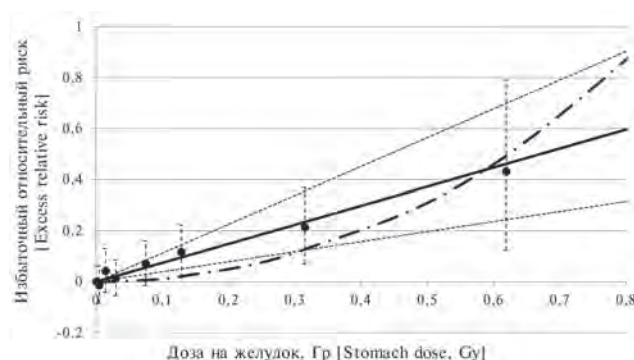


Рис. 2. Дозовая зависимость заболеваемости солидными ЗНО в УКАОН

Сплошная линия – линейная модель, штрих-пунктирная – квадратичная модель, точки – непараметрическая модель (значения ИОР в дозовых группах). Пунктирные линии – границы доверительных интервалов линейной модели

[Fig. 2. Dose dependence of solid cancer incidence in the SUPER cohort: solid line – linear model, dot-and dashed line – quadratic model, points – nonparametric model (ERR values in dose groups), dashed horizontal line – 95% bounds]

График квадратичной зависимости практически лежит в поле доверительных интервалов от линейной зависимости в диапазоне от 300 до 800 мГр и выходит за ее пределы ближе к 1 Гр. В наибольшей дозовой группе (среднее значение 620 мГр) линии моделей пересекаются. На рисунке 2 наглядно продемонстрировано, что в пределах до 0,8 Гр дозовая зависимость хорошо описывается линейной моделью.

Распределение числа случаев ЗНО, человеко-лет, избыточных случаев и атрибутивного риска по дозовым группам представлено в таблице 5. Число человеко-лет под риском заболеть солидными ЗНО для членов аналитической УКАОН за 62-летний период составило 1 283 267, а число ЗНО – 4357 случаев. Атрибутивный риск рассчитан по модельным данным как доля избыточных случаев от суммы (избыточные + базовые) случаев, рассчитанных по линейной модели в дозовых группах. Можно отметить, что атрибутивный риск свыше 5% по-

Таблица 5
Распределение числа случаев ЗНО, человеко-лет и атрибутивного риска по дозовым группам аналитической УКАОН
[Table 5

Distribution of cancer cases, person-years and attributive risk by dose groups of analytical SUPER cohort]					
Дозовые группы, мГр [Dose groups, mGy]	Солидные ЗНО [Solid cancers]	Человеко-годы [Person-years]	Случаи по линейной модели [Cases based on linear model]		
			Избыточные [Excess]	Базовые [Background]	Атрибутивный риск, % [Attributive risk]
0–2	1137	422 164	0,6	1145,3	0,1
2–10	701	204 500	2,6	710,1	0,4
10–20	556	142 224	5,8	533,4	1,1
20–50	805	190 806	17,6	793,6	2,2
50–100	566	145 485	29,6	528,7	5,3
100–200	446	109 735	38,1	399,3	8,7
200–500	255	56 747	50,1	210	19,3
500 мГр >	71	11 606	22,6	49,6	31,3
Вся когорта [Total]	4537	1 283 267	167	4370	3,7

является в дозовой группе от 50 до 100 мГр и увеличивается с увеличением дозы, согласно линейной модели. А в наибольшей дозовой группе (свыше 500 мГр) доля случаев, которые могут быть обусловлены воздействием дозы, составляет 31%. В целом, по нашим данным в когорте облученных на Южном Урале за 62 года наблюдения из 4537 зарегистрированных случаев ЗНО 167 могли быть обусловлены воздействием облучения, что составило 3,7% от всех ЗНО.

Исходя из полученных данных, можно сказать, что общее число дополнительных случаев ЗНО для всей наблюдаемой популяции за такой длительный период наблюдения является невысоким, что связано с невысокими дозами (90% населения получили дозу менее 100 мГр). При этом величина ИОР заболеваемости солидными ЗНО на единицу дозы облучения является сопоставимой с аналогичными оценками в исследованиях заболеваемости в Японской когорте выживших от атомных бомбардировок [18], ИОР=0,050/100мГр (95% ДИ: 0,042–0,059), в когорте ликвидаторов Чернобыльской аварии [19, 20] ИОР=0,047/100 мГр (95% ДИ: 0,003–0,096), рабочих рентгенологов и радиотехнологов в Китае [21] 0,087/100 мГр

(95% ДИ:0,048–0,145), в когорте рабочих INWORK (Великобритания, Франция, США) [22] ИОР смертности равен 0,047/100 мГр (95% ДИ:0,018–0,079).

Оценка влияния нерадиационных факторов на величину ИОР показана в таблице 6.

Впервые в исследованиях эффектов у лиц, облученных на Южном Урале, мы получили статистически значимые величины ИОР в отдельных группах по полу, этническим группам, возрасту начала облучения и достигнутому возрасту, что позволяет более корректно оценить влияние этих факторов на величину ИОР в нашей когорте, а также сравнить данные показатели с таковыми в других когортах.

По данным таблицы 6 можно видеть, что, основываясь на доверительных интервалах с 95% достоверностью, статистически значимые различия в величине ИОР у членов УКАОН наблюдаются только в разных этнических группах: показатели зависимости заболеваемости от дозы выше у лиц татарской и башкирской национальности, чем в группе славян. В последующем анализе мы сравним влияние этнической принадлежности на дозовую зависимость среди ЗНО разных локализаций. Относительно

Модификация ИОР заболеваемости солидными ЗНО нерадиационными факторами в аналитической УКАОН

Таблица 6

[Table 6]

Solid cancer ERR modification by non-radiation factors in the analytical SUPER cohort]

Факторы [Factors]	ИОР/100мГр [ERR/100mGy]	Доверительный интервал, 95% [Confidence interval]		P
		нижняя граница [lower]	верхняя граница, [upper]	
Пол [Sex]				
Мужчины [Male]	0,047	0,0006	0,101	<0,05
Женщины [Female]	0,100	0,050	0,156	<0,001
Этническая принадлежность [Ethnicity]				
Тюрки [Turks]	0,157*	0,085	0,239	<0,001
Славяне [Slavs]	0,042	0,004	0,084	<0,04
Факт переселения [Resettlement fact]				
Переселенные [Resettled]	0,074	0,039	0,112	<0,001
Непереселенные [Residents]	0,101	-0,013	0,241	0,09
Возраст начала облучения [Age at exposure]				
10 лет [10 years]	0,090	0,043	0,141	<0,001
40 лет [40 years]	0,056	0,003	0,109	<0,001
Достигнутый возраст [Attained age]				
30 лет [30 years]	0,049	0,012	0,127	<0,001
70 лет [70 years]	0,080	0,043	0,122	<0,001
Календарный период [Calendar period]				
1956–1985	0,039	-0,009	0,095	0,145
1986–2017	0,099	0,053	0,151	<0,001

* Величины ИОР получены с учетом влияния на базовые уровни пола, возраста, национальности, календарного периода, года рождения когорты при одновременном включении их в модель

[* The ERR values are obtained taking into account the effect on the basic levels of gender, age, ethnicity, calendar period, birth cohort year, while simultaneous including them in the model]

влияния других факторов на величину ИОР можно отметить тенденции (различия статистически незначимы) к более высоким показателям ИОР у женщин, чем у мужчин, у лиц, начавших облучаться в более молодом возрасте, у лиц, достигших более старшего возраста.

Необходимо отметить, что в более ранних работах у членов когорты реки Течи мы наблюдали незначимую тенденцию к увеличению ИОР с увеличением возраста начала облучения, что отличалось от зависимостей в других когортах, в частности, в японской когорте выживших после атомной бомбардировки, и было трудно объяснимо. В настоящем исследовании в связи с увеличением выборки и периода наблюдения, а также в связи с добавлением в когорту лиц, родившихся после начала облучения, мы получили тенденцию к уменьшению ИОР с увеличением возраста начала облучения, ИОР/100 мГр = 0,09 при облучении с 10 лет и ИОР/100 мГр = 0,056 при облучении с 40 лет.

В данном исследовании не рассматривается возможное влияние факта облучения родителей у лиц, родившихся и облученных после аварии, это будет обязательно представлено в последующих работах (предварительные исследования, проводившиеся у потомков КРТ в 2000-е гг., не выявили зависимости смертности от солидных ЗНО с гонадной дозой родителей).

Заключение

В данной работе приведены первые результаты по оценке дозовой зависимости заболеваемости солидными ЗНО в когорте, объединяющей население, облученное на Южном Урале в результате двух радиационных аварий за длительный период наблюдения, составивший 62 года (с 1956 по 2017 г.). По сравнению с последними опубликованными результатами заболеваемости солидными ЗНО в когорте реки Течи [8] численность когорты увеличена более чем в два раза, период наблюдения увеличен на 10 лет. Такие изменения привели к увеличению числа человеко-лет под риском почти в 3 раза (с 472,8 тысяч до 1283, 2 тысяч), а число ЗНО, вошедших в анализ, увеличилось более чем в 2 раза, с 1933 до 4537, что, несомненно, увеличило статистическую значимость результатов исследования. Дозы, использованные для анализа, рассчитаны по усовершенствованной дозиметрической системе TRDS-2016.

В результате анализа получена статистически значимая дозовая зависимость заболеваемости солидными ЗНО от дозы на желудок, которая хорошо описывается линейной моделью с использованием 5-летнего латентного периода (а также 2-летнего латентного периода). Добавление квадратичного компонента к линейной модели не улучшает подгонку модели ($p > 0,5$). Статистическая значимость эффекта сохраняется и при использовании квадратичной зависимости от дозы, но подгонка модели при этом не улучшается.

Величина ИОР, согласно линейной модели, усредненная по полу и возрасту, полученная в данной работе (ИОР/100 мГр = 0,075; 95% ДИ: 0,039–0,113), хорошо соответствует таковой, полученной ранее для членов КРТ (ИОР/100 мГр = 0,077; 95% ДИ: 0,013–0,150), при этом ширина доверительного интервала уменьшилась в полтора раза.

Увеличение статистической силы исследования позволило получить значимые показатели ИОР при разделении по полу, этнической принадлежности, возрасту начала облучения и достигнутому возрасту, а также более определенные показатели при разделении членов когорты в зависимости от факта переселения и на отдельные календарные периоды.

Различия ИОР в группах разной этнической принадлежности стали статистически достоверными: величина ИОР/100 мГр, равная 0,157 (0,085–0,239) у татар и башкир, выше, чем в группе славян, – ИОР/100 мГр 0,042 (0,004–0,084).

Получена значимая величина ИОР у мужчин, которая хорошо согласуется с таковой в когорте работников 3 стран (INWORKS) ИОР/100 мГр = 0,047 в УКАОН и 0,048 в INWORKS [22].

Данная работа является стартовой относительно анализа рисков в созданной когорте. Дальнейшие исследования будут включать более детальный анализ и оценку влияния других доступных факторов как радиационной природы (облучение в разных авариях и в разных возрастных категориях, влияние облучения во внутриутробном периоде), так и нерадиационных, а также оценку органоспецифических рисков и влияние факторов, зависящих от времени, на величины риска.

Благодарности

Данное исследование проводится при финансовой поддержке в рамках государственной программы с ФМБА, также выполнение отдельных задач поддерживается в рамках Российско-Американского соглашения под эгидой ОККИРВ. Исследование базируется на данных, собранных большим коллективом УНПЦ РМ за более чем полувековой период. Авторы выражают благодарность за большой вклад в сбор данных по жизненному статусу, истории проживания и причинам смерти сотрудникам отдела База данных «Человек», во главе со Старцевым Николаем Валерьевичем. Особую благодарность за трудоемкую и постоянно совершенствующуюся работу, связанную с оценкой индивидуализированных доз для облученного на Южном Урале населения, мы выражаем сотрудникам биофизической лаборатории (Толстых Е.И., Шишкиной Е.А., Бугрову Н.Г. и др.), которую много лет возглавляет Дегтева М.О. В подготовке данных по раковой заболеваемости принимают участие все сотрудники эпидемиологической лаборатории.

Литература

1. Медико-биологические и экологические последствия радиоактивного загрязнения реки Теча / Под ред. А.В. Аклеева, М.Ф. Киселева. М.: Вторая типография ФУ «Медбиоэкстрем», 2001. 531 с.
2. Аклеев А.В., Косенко М.М., Крестинина Л.Ю., и др. Здоровье населения, проживающего на радиоактивных территориях Уральского региона. М.: РАДЭКОН, 2001. 194 с.
3. Дегтева М.О., Напье Б.А., Толстых Е.И., и др. Распределение индивидуальных доз в когорте людей, облученных в результате радиоактивного загрязнения реки Течи // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2019. № 3. С. 46–53.
4. Бурназян А.И. Итоги изучения и опыт ликвидации последствий аварийного загрязнения территории продуктами деления урана. М: Энергоатомиздат, 1990. 144 с.

5. Kosenko M.M., Degteva M.O. Cancer mortality and radiation risk evaluation for the Techa river population // *The science of the total environment*. 1994. Vol. 142. P. 73-89.
6. Косенко М.М., Аклеев А.В., Крестинина Л.Ю. Методология наблюдения за когортой лиц, облучившихся на реке Теча // *Сибирский медицинский журнал*. 2003. Т. 18, № 5. С. 40-49.
7. Крестинина Л.Ю., Аклеев А.В. Отдаленные соматическо-стохастические эффекты. Последствия радиоактивного загрязнения реки Течи // Под ред. проф. А.В. Аклеева. Челябинск: «Книга», 2016. Гл. 9. С. 270-281.
8. Davis F.G., Krestinina L.Yu., Preston D., et al. Solid cancer incidence in the Techa River Incidence Cohort: 1956–2007 // *Radiation Research*. 2015. Vol. 184. P. 56–65. DOI: 10.1667/RR14023.1.
9. Schonfeld S.J., Krestinina L.Yu., Epifanova S., et al. Solid cancer mortality in the Techa River Cohort (1950-2007) // *Radiation Research*. 2013. Vol. 179. P. 183-189.
10. Крестинина Л.Ю., Аклеев А.В. Онкологическая смертность при хроническом воздействии малых и средних доз облучения в когорте лиц, облученных на ВУРС // *Бюллетень сибирской медицины*. 2005. Т. 4, № 2. С. 36-44.
11. Аклеев А.В., Крестинина Л.Ю., Коньшина Л.Г., и др. Состояние здоровья населения Челябинской, Свердловской и Курганской областей, проживающего на радиоактивно загрязненных территориях; под ред. С.К. Шойгу // *Последствия техногенного радиационного воздействия и проблемы реабилитации Уральского региона*. М.: Комтехпринт, 2002. Гл. 4. С. 204-237.
12. Силкин С.С., Крестинина Л.Ю. Анализ смертности от злокачественных новообразований в когорте населения, облученного на Восточно-Уральском радиоактивном следе за 57-летний период // *Медицина экстремальных ситуаций*. 2019. Т. 21, № 2. С. 258-265.
13. Силкин С.С., Крестинина Л.Ю., Толстых Е.И., Епифанова С.Б. Анализ риска заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями у населения, облучившегося на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа за период с 1957 по 2009 г. // *Радиационная гигиена*. 2017. Т. 10, №1. С. 36–46. DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-1-36-46.
14. Аклеев А.В., Дегтева М.О., Крестинина Л.Ю. Сравнительный анализ медико-дозиметрических последствий аварии 1957 г. и загрязнения реки Течи в контексте эффективности защитных мероприятий // *Радиационная гигиена*. 2020. Т.13, №1. С. 16 – 26. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-16-26.
15. Силкин С.С., Крестинина Л.Ю., Старцев Н.В., Аклеев А.В. Уральская когорта аварийно-облученного населения // *Медицина экстремальных ситуаций*. 2019. Т. 21, №3. С. 393-402.
16. Degteva M.O., Napier, B.A., Tolstykh E.I., et al. Enhancements in the Techa River Dosimetry System: TRDS-2016D code for reconstruction of deterministic estimates of dose from environmental exposures // *Health Phys*. 2019. № 117 (4). P. 378-387.
17. Preston D.L. *Epicure Users Guide*. Seattle, Washington: Hirosoft International Corporation, 1993.
18. Grant E.J., Brenner A.V., Sugiyama H., et al. Solid cancer incidence among the Life Span Study of atomic bomb survivors: 1958-2009 // *Radiation Research*. 2017. Vol. 187, No 5. P. 513-537.
19. Kashcheev V.V., Chekin S.Yu., Maksiutov M.A., et al. Incidence and mortality of solid cancer among emergency workers of the Chernobyl accident: assessment of radiation risks for the follow-up of 1992-2009 // *Radiation Environment Biophysics*. 2015. Vol. 54, No 1. P. 13-23.
20. Ivanov V.K., Karpenko S.V., Kashcheev V.V., et al. Radiation risks of Russian liquidators of the Chernobyl accident for the period 1992-2017. Part I: Solid cancer incidence // *Radiation and Risk*. 2019. Vol. 28, No 4. P. 16-30.
21. Sun Z., Inskip P.D., Wang J., et al. Solid cancer incidence among Chinese medical diagnostic x-ray workers, 1950-1995: Estimation of radiation-related risks // *International Journal of Cancer*. 2016. Vol. 138, No 12. P. 2875-2883. doi:10.1002/ijc.30036.
22. Richardson D.B., Cardis E., Daniels R.D., et al. Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS) // *British Medical Journal*. 2015. Vol. 351, H. 5359. doi: 10.1136/bmj.h5359.

Поступила: 26.06.2020 г.

Крестинина Людмила Юрьевна – кандидат медицинских наук, заведующая эпидемиологической лабораторией Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России. **Адрес для переписки:** 454141, Россия, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: ludmila@urcrm.ru

Силкин Станислав Сергеевич – младший научный сотрудник эпидемиологической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия

Микрюкова Людмила Дмитриевна – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник эпидемиологической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия

Епифанова Светлана Борисовна – старший инженер эпидемиологической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия

Аклеев Александр Васильевич – доктор медицинских наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, директор Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия

Для цитирования: Крестинина Л.Ю., Силкин С.С., Микрюкова Л.Д., Епифанова С.Б., Аклеев А.В. Риск заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями в Уральской когорте аварийно-облученного населения: 1956–2017 // *Радиационная гигиена*. 2020. Т. 13, № 3. С. 6–17. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-6-17

Solid cancer incidence risk in the Ural cohort of the accidentally exposed population: 1956–2017

Lyudmila Yu. Krestinina, Stanislav S. Silkin, Lyudmila D. Mikryukova, Svetlana B. Epifanova, Alexander V. Akleyev

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

To date, the study of the effects of chronic exposure of the South Ural population has been carried out in two separate cohorts – in the Techa River Cohort and in the East Urals Radioactive Trace Cohort. In 2019, the Ural cohort of accidentally exposed population was formed. It included the population exposed in two radiation situations in the Southern Urals in the 1950s. The number of the combined cohort for the cancer incidence analysis was about 60 thousand people, the follow-up period was extended to 2017, the number of solid cancers was 4537, and the number of person-years was 1283267, which is 3 times more than when analyzing the effects of exposure in each of the two radiation situations separately. In the incidence analysis of all solid cancer types, we used the dose accumulated in the walls of the stomach, which corresponds to the dose accumulated in most organs and tissues with the exception of bone tissue and red bone marrow. The mean dose to the stomach accumulated over the entire follow-up period for cohort members was 38 mGy, the maximum – 1.13 Gy. The paper presents the first results of solid cancer incidence risk analysis in the combined cohort, which show a statistically significant dose dependence of the incidence in case of chronic exposure in the range of low and medium doses. The sex and age-averaged excess relative risk value of 0.075/100 mGy (the 95% confidence interval is 0.039–0.113) is comparable to that obtained in the studies of the Japanese cohort of atomic bomb survivors. The statistically significant excess relative risk value of 0.047/100 mGy, obtained separately for men, is in good agreement with that in professional cohorts where men prevail – in the cohort of the Chernobyl NPP accident clean-up workers and in the cohort of professional workers in the three countries (UK, France, USA). The established cohort with a long follow-up period has a great potential for furthermore detailed studies of the effects of radiation and non-radiation factors on public health.

Key words: solid cancers, excess relative risk, incidence ERR, Ural cohort of the accidentally exposed population, chronic exposure.

References

1. Medical-biological impacts of radioactive contamination of the Techa River. Ed. Akleyev AV, Kiselev MF. Moscow: Medbioextrem, Russian Ministry of Health; 2001: 531. (In Russian).
2. Akleyev AV, Kosenko MM, Krestinina LY, Shalaginov SA, Degteva MO, Startsev NV. The health of the population living on radioactive territories of the Ural region. Moscow: RADECON; 2001:194. (In Russian).
3. Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, Shishkina EA, Bugrov NG, Krestinina LY, et al. Individual dose distribution in cohort of people exposed as a result of radioactive contamination of the Techa River. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology & Radiation Safety*. 2019;64(3): 46–53. (In Russian).
4. Burnazyan AI. Results of the study and experience in elimination of the consequences of accidental contamination of a territory with uranium fission products. Moscow: Energoatomizdat; 1990: 144. (In Russian).
5. Kosenko MM, Degteva MO. Cancer mortality and radiation risk evaluation for the Techa River population. *The science of the total environment*. 1994;142(1-2): 73-89. doi:10.1016/0048-9697(94)90075-2.
6. Kosenko MM, Akleyev AV, Krestinina LY. Supervision methodology of the cohort of subjects who were exposed to radiation on the Techa river. *Sibirskiy meditsinskiy zhurnal = Siberian Medical Journal*. 2003;18(5): 40-49. (In Russian).
7. Krestinina LY, Akleyev AV. Long-term somatic-stochastic effects. Edited. by AV. Akleyev. Consequences of radioactive contamination of the Techa River. Chelyabinsk: Kniga; 2016;9: 270-330. (In Russian).
8. Davis FG, Krestinina LY, Preston D, Epifanova S, Degteva M, Akleyev AV. Solid Cancer Incidence in the Techa River Incidence Cohort: 1956–2007. *Radiation Research*. 2015;184:56–65. DOI: 10.1667/RR14023.1.
9. Schonfeld SJ, Krestinina LY, Epifanova S, Degteva MO, Akleyev AV, Preston DL. Solid cancer mortality in the Techa River Cohort (1950–2007). *Radiation Research*. 2013;179: 183–189.
10. Krestinina LY, Akleyev AV. Cancer mortality under chronic exposure of low and moderate radiation doses in the cohort of persons who were exposed due to the EURT. *Byulleten sibirskoy meditsiny = Bulletin of Siberian Medicine*. 2005;4(2): 36-44. (In Russian).
11. Akleyev AV, Krestinina LY, Konshina LG, Kosenko MM, Startsev NV, Goryacheva LV. The health status of the population of Chelyabinsk, Sverdlovsk and Kurgan regions, living in radioactively contaminated territories. Consequences of technogenic radiation exposure and the problem of rehabilitation of the Ural region. Ed. Shoygu SK. Moscow: Komtechprint; 2002: 204-237. (In Russian).
12. Silkin SS, Krestinina LY. Analysis of 57 years mortality from malignant neoplasms in a population cohort, irradiated in the East-Ural radioactive trace. *Meditsina ekstremalnykh situatsiy = Medicine of Extreme Situations*. 2019;21(2): 276-283. (In Russian).
13. Silkin SS, Krestinina LY, Tolstykh EI, Epifanova SB. Analysis of solid cancer incidence risk among the population exposed in the East Urals Radioactive Trace

Lyudmila Yu. Krestinina

Urals Research Center for Radiation Medicine

Address for correspondence: Vorovskogo Str., 68-A, Chelyabinsk, 454076, Russia; E-mail: ludmila@urcrm.ru

- over 1957-2009. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(1): 36-46. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426x-2017-10-1-36-46.
14. Akleyev AV, Krestinina LYu, Degteva MO. Comparative analysis of medical and dosimetric consequences of the 1957 accident and contamination of the Techa river from the perspective of protective measures efficiency. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(1): 16-26. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-16-26.
 15. Silkin SS, Krestinina LYu, Startsev NV, Akleyev AV. Ural cohort of emergency-irradiated population. *Medsina ekstremal'nykh situatsiy = Medicine of Extreme Situations*. 2019;21(3): 393-402. (In Russian).
 16. Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, Shishkina EA, Shagina NB, Volchkova AYU, et al. Enhancements in the Techa River Dosimetry System: TRDS-2016D Code for reconstruction of Deterministic Estimates of Dose from Environmental Exposures. *Health Phys*. 2019;117(4): 378-387. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001067>.
 17. Preston DL, Lubin JH, Pierce D., McConney ME. *Epicure Users Guide*. Seattle, Washington: Hirosoft International Corporation; 1993.
 18. Grant EJ, Brenner A, Sugiyama H, Sakata R, Sadakane A, Utada M, et al. Solid Cancer Incidence among the Life Span Study of Atomic Bomb Survivors: 1958-2009. *Radiation Research*. 2017;187(5): 513-537. doi:10.1667/RR14492.1.
 19. Kashcheev VV, Chekin SY, Maksyutov MA, Tumanov KA, Kochergina EV, Kashcheeva PV, et al. Incidence and mortality of solid cancer among emergency workers of the Chernobyl accident: assessment of radiation risks for the follow-up period of 1992-2009. *Radiation Environmental Biophysics*. 2015;54(1): 13-23. doi:10.1007/s00411-014-0572-3.
 20. Ivanov VK, Karpenko SV, Kashcheev VV, Chekin SYU, Maksyutov MA, Tumanov KA, et al. Radiation risks of Russian liquidators of the Chernobyl accident for the period 1992-2017. Part I: Solid cancer incidence. *Radiation and Risk*. 2019;28(4): 16-30.
 21. Sun Z, Inskip PD, Wang J, Kwon D, Zhao Y, Zhang L, et al. Solid cancer incidence among Chinese medical diagnostic x-ray workers, 1950-1995: Estimation of radiation-related risks. *International Journal of Cancer*. 2016;138(12): 2875-2883. doi:10.1002/ijc.30036.
 22. Richardson DB, Cardis E, Daniels RD, Gillies MA, O'Hagan JA, Hamra GB [et al.] Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS). *British Medical Journal*. 2015;351: 5359. doi: 10.1136/bmj.h5359.

Received: June 26, 2020

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

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

Lyudmila D. Mikryukova – Candidate of Medical Sciences, Senior researcher of Epidemiological Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

Svetlana B. Epifanova – Senior engineer of Epidemiological Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

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

For citation: Krestinina L.Yu., Silkin S.S., Mikryukova L.D., Epifanova S.B., Akleyev A.V. Solid cancer incidence risk in the Ural cohort of the accidentally exposed population: 1956-2017. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No. 3. P. 6-17. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-6-17

Динамика показателей заболеваемости раком толстого кишечника в когорте работников, подвергшихся профессиональному облучению

Г.В. Жунтова¹, Т.В. Азизова¹, М.В. Банникова¹, Т.П. Заварухина²

¹Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства России, Озерск, Россия

²Клиническая больница № 71 Федерального медико-биологического агентства России, Озерск, Россия

Рак толстого кишечника входит в число наиболее распространенных злокачественных новообразований. Основными причинами возникновения опухолей этой локализации являются факторы, связанные с образом жизни, а также профессиональный контакт с некоторыми химическими агентами. В отдельных исследованиях установлено влияние ионизирующего излучения на заболеваемость и смертность от рака толстого кишечника. Целью настоящего исследования являлась оценка динамики заболеваемости раком толстого кишечника в когорте работников предприятия атомной промышленности — производственного объединения «Маяк», подвергшихся пролонгированному профессиональному облучению. Когорта включала 22 377 работников (25% — женщины), нанятых на основные заводы производственного объединения «Маяк» (реакторный, радиохимический, плутониевый) в 1948–1982 гг., которые подвергались пролонгированному общему внешнему гамма-облучению (накопленные поглощенные в стенке толстой кишки дозы 0–5,85 Гр, медиана 0,16 Гр), а в случае ингаляционного поступления соединений плутония — также внутреннему альфа-облучению (накопленные поглощенные в стенке толстой кишки дозы 0–0,18 Гр, медиана 0,0002 Гр). В период 1948–2018 гг. в изучаемой когорте диагностировано 239 случаев рака ободочной кишки и 186 случаев рака прямой кишки. Показатели заболеваемости раком толстого кишечника у работников изучаемой когорты статистически значимо увеличивались с возрастом старше 50 лет, стандартизованные по возрасту показатели были выше у мужчин по сравнению с женщинами. Анализ временных трендов стандартизованных показателей заболеваемости раком толстого кишечника у работников изучаемой когорты была выполнен с помощью сплайн-регрессии. Динамика стандартизованных показателей заболеваемости раком толстого кишечника у персонала производственного объединения «Маяк» в изучаемый период времени носила разнонаправленный характер. В целом, в 2014–2018 гг. среднегодовой темп прироста заболеваемости раком ободочной кишки составил менее 0,1% (оба пола), аналогичный показатель для рака прямой кишки у мужчин был равен 1,1%, а у женщин достигал 30,3%. Для оценки влияния профессионального облучения работников на заболеваемость раком толстого кишечника требуется анализ радиогенного риска с учетом действия нерадиационных факторов.

Ключевые слова: рак толстого кишечника, работники производственного объединения «Маяк», профессиональное облучение.

Введение

В последние десятилетия во многих странах, включая Россию, отмечен рост заболеваемости и смертности от рака толстого кишечника [1–2]. Опухоли этой локализации входят в число наиболее распространенных злокачественных новообразований (ЗНО) и занимают третье место в структуре онкологической заболеваемости у мужчин и второе место у женщин [1–2].

Заболеваемость раком толстого кишечника увеличивается с достигнутым возрастом и выше у мужчин по сравнению с женщинами [1–2]. Около 90% случаев ЗНО этой локализации в популяции связаны с особенностями образа жизни: характер питания, курение, употребление алкоголя, ожирение, низкая физическая активность

[3–5]. Вариабельность заболеваемости раком толстого кишечника между странами и представителями различных групп населения объясняется, главным образом, различиями в распространенности перечисленных выше факторов [6].

Семейные формы ЗНО толстого кишечника, как правило, обусловлены взаимодействием факторов, связанных с образом жизни, и генетической предрасположенности к развитию ЗНО этой локализации [7]. Около 5–7% случаев рака толстого кишечника вызваны редкими мутациями, сопряженными с очень высоким риском развития опухоли (синдром Линча и др.) [8].

Повышенный риск ЗНО толстого кишечника выявлен у работников некоторых отраслей промышленности (це-

Жунтова Галина Вадимовна

Южно-Уральский институт биофизики

Адрес для переписки: 456780, Челябинская обл., г. Озерск, Озерское шоссе, д. 19; E-mail: clinic@subi.su

ментная, текстильная, деревообрабатывающая, металлургическая, химическая, контакт с асбестом) [9–11]. Влияние ионизирующей радиации на риск рака толстого кишечника обнаружено в результате наблюдения за лицами, пережившими атомную бомбардировку в Японии, а также среди пациентов, перенесших лучевую терапию по поводу заболеваний органов малого таза [14–15].

В исследовании, включавшем работников ядерной промышленности Франции, Великобритании и США, обнаружено некоторое повышение избыточного относительного риска заболеваемости раком ободочной и прямой кишки, но зависимость от доз профессионального облучения не являлась статистически значимой [16]. Ранее в когорте персонала первого в России предприятия атомной промышленности ФГУП «Производственное объединение «Маяк»» (ПО «Маяк») не было выявлено связи между риском заболеваемости (в период 1948–2004 гг.) и смертности (в период 1948–2008 гг.) от рака толстого кишечника [17–18]. К настоящему времени увеличился период наблюдения за когортой, что создает предпосылки для уточнения полученных ранее результатов.

Цель исследования – оценка динамики заболеваемости раком толстого кишечника в когорте работников ПО «Маяк», подвергшихся пролонгированному профессиональному облучению.

Материалы и методы

Исследуемая когорта включала 22 377 работников (в том числе 25% – женщины), нанятых на основные заводы ПО «Маяк» (реакторный, радиохимический, плутониевый) в 1948–1982 гг., которые подвергались пролонгированному общему внешнему гамма-облучению и, кроме этого, в случае ингаляционного поступления соединений плутония, – внутреннему альфа-облучению. ПО «Маяк» введено в эксплуатацию в 1948 г. В первые годы после пуска предприятия в связи с несовершенством технологических процессов дозы облучения у части персонала были высокими [19].

Мониторинг внешнего гамма-облучения работников ПО «Маяк» осуществлялся с помощью индивидуальных дозиметров, мониторинг внутреннего альфа-облучения – путем измерения альфа-активности плутония в суточных пробах мочи. Для оценки доз профессионального облучения разработаны специальные дозиметрические системы. В настоящем исследовании характеристика профессионального облучения работников приведена в соответствии с «Дозиметрической системой работников ПО «Маяк»–2013» [19].

У работников изучаемой когорты накопленные за весь период наблюдения поглощенные в стенке толстого кишечника дозы внешнего гамма-излучения находились в пределах 0–5,85 Гр (медиана 0,16 Гр); дозы внутреннего альфа-излучения имели диапазон 0–0,18 Гр (медиана 0,0002 Гр).

Благодаря специальной системе медицинского наблюдения за работниками ПО «Маяк», а также тщательно отлаженному процессу сбора и хранения данных о состоянии здоровья доступна качественная информация о заболеваемости персонала предприятия [20]. Сведения о перенесенных заболеваниях за весь период наблюдения собраны на 21 740 (97%) членов изучаемой когорты.

По состоянию на 31 декабря 2018 г. жизненный статус установлен для 95% членов когорты; из них умерли 66% мужчин и 59% женщин. Средний возраст ($\pm$ стандартное отклонение) умерших был равен 64,6 $\pm$ 14,1 лет; а средний возраст тех, кто был жив на конец 2018 г., составил 75,5 $\pm$ 10,8 лет.

Вычислены показатели заболеваемости раком ободочной (код С18 МКБ-10) и прямой кишки (коды С19–С21 МКБ-10) у работников изучаемой когорты в период 1948–2018 гг. Стандартизация показателей была выполнена косвенным методом с использованием в качестве внутреннего стандарта по возрасту распределения всей изучаемой когорты работников ПО «Маяк» в целом [21]. Показатели заболеваемости рассчитывали на 1000 человеко-лет наблюдения. Для оценки статистической значимости разницы средних величин использовали *t*-критерий Стьюдента [22]. Различия считали значимыми при $p < 0,05$. Анализ динамики стандартизованных по возрасту показателей (СП) заболеваемости раком толстого кишечника был выполнен с помощью сплайн-регрессии [23].

Результаты и обсуждение

В период 1948–2018 гг. в изучаемой когорте было зарегистрировано 239 случаев рака ободочной кишки, из них 155 (65%) случаев у мужчин и 84 (35%) – у женщин; а также 186 случаев рака прямой кишки, из них 139 (75%) случаев у мужчин и 47 (25%) – у женщин. Возраст работников на момент установления диагноза ЗНО толстого кишечника находился в пределах от 28 до 95 лет, медиана возраста диагностики составила для рака ободочной кишки 68 лет (оба пола), для рака прямой кишки – 67 лет у мужчин и 65 лет у женщин.

Показатели заболеваемости раком толстого кишечника у работников изучаемой когорты увеличивались с достигнутым возрастом (табл. 1). У мужчин обнаружено статистически значимое ($p < 0,05$) повышение показателей заболеваемости опухолями указанной локализации в последовательных возрастных категориях, начиная с 50–59 лет до 70–79 лет. У женщин статистически значимое ($p < 0,05$) повышение заболеваемости раком ободочной кишки наблюдалось в интервалах 50–59 лет и 60–69 лет (по сравнению с предыдущей возрастной категорией), а раком прямой кишки – в категориях 50–59 лет и от 80 лет и старше.

У мужчин СП заболеваемости раком толстого кишечника (в среднем в период 1948–2018 гг.) была статистически значимо выше, чем у женщин ($p < 0,05$), и составляла для опухолей ободочной кишки 0,42 $\pm$ 0,03 на 1000 человеко-лет (мужчины) и 0,32 $\pm$ 0,04 на 1000 человеко-лет (женщины), а для опухолей прямой кишки – 0,39 $\pm$ 0,03 на 1000 человеко-лет (мужчины) и 0,19 $\pm$ 0,03 на 1000 человеко-лет (женщины) (см. табл. 1).

В когорте работников ПО «Маяк» возрастная динамика показателей заболеваемости раком толстого кишечника, а также соотношение этих показателей у мужчин и женщин в целом соответствовали общепопуляционным данным [1–2]. Согласно мировой статистике, мужчины заболевают раком толстого кишечника на 30% чаще, чем женщины, заболеваемость опухолями этой локализации повышается с возрастом, особенно после 50 лет.

Динамика СП заболеваемости раком толстого кишечника у работников изучаемой когорты в период 1948–2018 гг. представлена на рисунках 1–4. Не обнаружено

Таблица 1

Показатели заболеваемости раком толстого кишечника в изучаемой когорте ($\pm$ ошибка среднего) на 1000 человеко-лет
[Table 1]

Colorectal cancer incidence rates in the study cohort ($\pm$ standard error) per 1000 person-years

Возраст на момент диагноза, лет [Age at diagnosis, years]	Рак ободочной кишки [Colon cancer]		Рак прямой кишки [Rectum cancer]	
	Мужчины [Males]	Женщины [Females]	Мужчины [Males]	Женщины [Females]
< 40	0,03 $\pm$ 0,01	0,02 $\pm$ 0,02	0,02 $\pm$ 0,01	0,02 $\pm$ 0,02
40–49	0,05 $\pm$ 0,02	0,06 $\pm$ 0,04	0,03 $\pm$ 0,02	0,14 $\pm$ 0,06
50–59	0,38 $\pm$ 0,07*	0,47 $\pm$ 0,12*	0,33 $\pm$ 0,07*	0,38 $\pm$ 0,11*
60–69	1,06 $\pm$ 0,15*	0,95 $\pm$ 0,19*	1,10 $\pm$ 0,16*	0,44 $\pm$ 0,13
70–79	2,59 $\pm$ 0,37*	1,28 $\pm$ 0,27	2,33 $\pm$ 0,35*	0,39 $\pm$ 0,15
80+	2,76 $\pm$ 0,83	1,50 $\pm$ 0,50	2,51 $\pm$ 0,79	1,50 $\pm$ 0,50*
Стандартизованный по возрасту показатель [Age-standardized rate]	0,42 $\pm$ 0,03§	0,32 $\pm$ 0,04	0,39 $\pm$ 0,03§	0,19 $\pm$ 0,03

* – статистически значимые различия с предыдущей возрастной категорией;

§ – статистически значимые различия между мужчинами и женщинами

[* – statistically significant differences between two consequent categories;

§ – statistically significant differences between males and females]



Рис. 1. Динамика стандартизованных по возрасту показателей заболеваемости раком ободочной кишки у работников изучаемой когорты в 1948–2018 гг. (мужчины)
[Fig. 1. Trend in age-standardized colon cancer incidence rates in workers of the study cohort over 1948-2018 (males)]

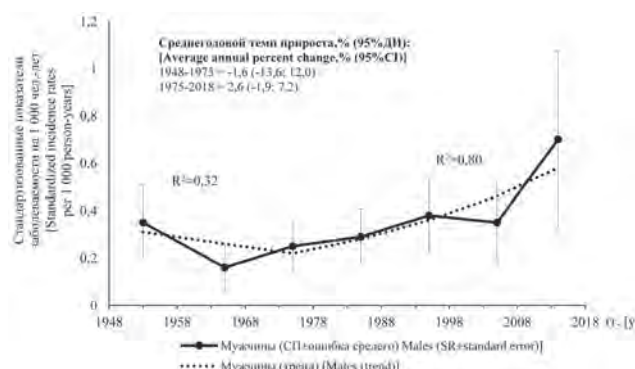


Рис. 3. Динамика стандартизованных по возрасту показателей заболеваемости раком прямой кишки у работников изучаемой когорты в 1948–2018 гг. (мужчины)
[Fig. 3. Trend in age-standardized rectum cancer incidence rates in workers of the study cohort over 1948-2018 (males)]



Рис. 2. Динамика стандартизованных по возрасту показателей заболеваемости раком ободочной кишки у работников изучаемой когорты в 1948–2018 гг. (женщины)
[Fig. 2. Trend in age-standardized colon cancer incidence rates in workers of the study cohort over 1948-2018 (females)]



Рис. 4. Динамика стандартизованных по возрасту показателей заболеваемости раком прямой кишки у работников изучаемой когорты в 1948–2018 гг. (женщины)
[Fig. 4. Trend in age-standardized rectum cancer incidence rates in workers of the study cohort over 1948-2018 (females)]

статистически значимых различий между СП заболеваемости раком ободочной и прямой кишки, относящихся к последовательным временным интервалам.

Анализ динамики СП заболеваемости раком ободочной кишки, выполненный на основе сплайн-регрессии, дал следующие результаты: у мужчин в 1948–1995 гг. отмечался ежегодный прирост указанных показателей в среднем на 1,5%, а в 1995–2018 гг. – их снижение на 2,1%; у женщин в 1948–1975 гг. обнаружено снижение СП на 2,5% в год, которое в 1975–2018 гг. сменилось ежегодным приростом на 1,4% (см. рис. 1 и 2). Временной тренд СП заболеваемости раком ободочной кишки являлся статистически значимым ($p < 0,05$) только в период 1975–2018 гг. у женщин.

В изучаемой когорте у мужчин в 1948–1975 гг. наблюдалось снижение СП заболеваемости раком прямой кишки в среднем на 1,6% в год, среднегодовой темп прироста этого показателя в 1975–2018 гг. составил 2,6% (см. рис. 3). У женщин в 1948–1975 гг. ежегодный прирост СП заболеваемости раком прямой кишки достигал 69,7%, а в 1975–2018 гг. снижение этого показателя составило 7,1% в год (см. рис. 4). Статистически значимый временной тренд СП заболеваемости раком прямой кишки обнаружен только в период 1948–1975 гг. у женщин.

В целом, в период 1948–2018 гг. в изучаемой когорте СП заболеваемости раком ободочной кишки у мужчин и женщин повышались незначительно, среднегодовой темп прироста составил менее 0,1% (табл. 2). В большей степени увеличивались СП заболеваемости раком прямой кишки: у мужчин среднегодовой темп прироста СП был равен 1,1%, а у женщин достигал 30,3% (см. табл. 2).

В 1998–2018 гг. в Российской Федерации отмечался рост СП заболеваемости ЗНО толстого кишечника, в большей степени ЗНО ободочной кишки (см. табл. 2) [2, 24]. Оценки среднегодового темпа прироста заболеваемости раком толстого кишечника в соответствующий период времени у работников изучаемой когорты являлись достаточно вариabельными и не достигали уровня статистической значимости, что отчасти может быть обусловлено относительно небольшим числом случаев ЗНО толстого кишечника в изучаемой когорте, особенно у

женщин (см. табл. 2). Тем не менее, высокие среднегодовые темпы прироста заболеваемости ЗНО прямой кишки у женщин в отдельные календарные периоды требуют дополнительного анализа и объяснения.

В рамках настоящего исследования не учитывалась распространенность целого ряда этиологических факторов ЗНО толстого кишечника у работников изучаемой когорты. В то же время известно, что различия в заболеваемости опухолями этой локализации между отдельными странами, а также изменение уровня заболеваемости во времени зависят не только от возрастно-полового состава населения, но и в значительной мере от факторов, связанных с образом жизни (питание, курение и др.) [3–4]. Наряду с этими факторами, возможная роль профессионального облучения в возникновении ЗНО толстого кишечника у работников изучаемой когорты требует дополнительного анализа.

Заключение

В течение календарного периода с 1948 по 2018 г. в когорте работников предприятия атомной промышленности ПО «Маяк», впервые нанятых на основные заводы в 1948–1982 гг., обнаружено увеличение СП заболеваемости ЗНО ободочной и прямой кишки, как у мужчин, так и у женщин. В 1948–2018 гг. среднегодовой темп прироста СП заболеваемости ЗНО ободочной кишки у работников изучаемой когорты составил менее 0,1%, среднегодовой темп прироста заболеваемости ЗНО прямой кишки был равен 1,1% у мужчин и 30,3% у женщин, однако эти оценки не достигали уровня статистической значимости.

Стандартизованные по возрасту показатели заболеваемости ЗНО толстого кишечника у работников изучаемой когорты в различные временные интервалы были достаточно вариabельными, и их динамика носила разнонаправленный характер. Следует отметить, что в течение анализируемого периода времени число ЗНО толстого кишечника у работников изучаемой когорты было относительно невелико, что могло повлиять на полученные результаты, включая, в частности, высокие оценки среднегодового темпа прироста ЗНО прямой кишки у женщин.

Таблица 2

Среднегодовой темп прироста стандартизованных по возрасту показателей заболеваемости раком толстого кишечника у работников изучаемой когорты и населения Российской Федерации

[Table 2]

Average annual percent change in age-standardized colorectal cancer incidence rates in the study cohort workers and the background Russian population]

Локализация опухоли [Tumor site]	Пол [Sex]	Работники ПО «Маяк» [Mayak PA workers]			Российская Федерация* [Russian Federation*]	
		1948–2018	1998–2008	2008–2018	1998–2008	2008–2018
Ободочная кишка [Colon]	Мужчины [Males]	+0,05%	+0,8%	-3,9%	+1,98%	+1,86%
	Женщины [Females]	+0,09%	+1,6%	+1,9%	+1,86%	+1,28%
Прямая кишка [Rectum]	Мужчины [Males]	+1,1%	-0,8%	+10,0%	+1,64%	+0,91%
	Женщины [Females]	+30,3%	-6,5%	+26,3%	+0,85%	+0,79%

* Данные опубликованы МНИОИ им. Герцена [data provided by P.A. Hertsen Moscow Oncology Research Center] [2, 28].

В изучаемой когорте, как и в общей популяции, показатели заболеваемости ЗНО толстого кишечника были выше у мужчин по сравнению с женщинами и увеличивались в возрасте старше 50 лет.

Для оценки влияния профессионального облучения работников на заболеваемость ЗНО толстого кишечника требуется анализ радиогенного риска с учетом действия нерадиационных факторов.

Литература

1. Bray F., Ferlay J., Soerjomataram I., et al. Global cancer statistics 2018: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries // *CA Cancer J. Clin.* 2018. Vol. 68, No 6. P. 394-424.
2. Каприн А.Д. Злокачественные новообразования в России в 2018 году (заболеваемость и смертность); под ред. Каприна А.Д., Старинского В.В., Петровой Г.В. М: МНИОИ им. П.А. Герцена, 2019. 250 с.
3. Brenner H., Chen C. The colorectal cancer epidemic: challenges and opportunities for primary, secondary and tertiary prevention // *Br. J. Cancer.* 2018. Vol. 119, No 7. P. 785-792.
4. Murphy N., Moreno V., Hughes D.J., et al. Lifestyle and dietary environmental factors in colorectal cancer susceptibility // *Mol. Aspects Med.* 2019. Vol. 69. P. 2-9.
5. Carr P.R., Weigl K., Jansen L., et al. Effects of Physical Activity on Risk of Colorectal Cancer: A Case-control Study // *Int. J. Prev. Med.* 2018. Vol. 155, No 6. P. 1805-1815.
6. Doubeni C.A., Laiyemo A.O., Major J.M., et al. Socioeconomic status and the risk of colorectal cancer: An analysis of over one-half million adults in the NIH-AARP Diet and Health Study // *Cancer.* 2012. Vol. 118, No 14. P. 3636-44.
7. Schumacher F.R., Schmit S.L., Jiao S., et al. Genome-wide association study of colorectal cancer identifies six new susceptibility loci // *Nat Commun.* 2015. Vol. 6. P. 7138.
8. Patel S.G., Ahnen D.J. Familial colon cancer syndromes: an update of a rapidly evolving field // *Curr. Gastroenterol. Rep.* 2012. Vol. 14, No 5. P. 428-38.
9. Eguchi H., Wada K., Prieto-Merino D., Smith D.R. Lung, gastric and colorectal cancer mortality by occupation and industry among working-aged men in Japan // *Sci. Rep.* 2017. Vol. 7. P. 43204.
10. Paris C., Thaon I., Hérin F., et al. Occupational Asbestos Exposure and Incidence of Colon and Rectal Cancers in French Men: The Asbestos-Related Diseases Cohort (ARDCo-Nut) // *Environ. Health. Perspect.* 2017. Vol. 125, No 3. P. 409-415.
11. Singh Z., Chadha P. Textile industry and occupational cancer // *Journal of Occupational Medicine and Toxicology.* 2016. Vol. 11, No 39. P. 1-6.
12. Ozasa K., Shimizu Y., Suyama A., et al. Studies of the mortality of atomic bomb survivors, Report 14, 1950-2003: an overview of cancer and noncancer diseases // *Radiat. Res.* 2012. Vol. 177, No 3. P. 229-43.
13. Preston D.L., Ron E., Tokuoka S., et al. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958-1998 // *Radiat. Res.* 2007. Vol. 168, No 1. P. 1-64.
14. Kleinerman R.A., Boice J.D.Jr., Storm H.H., et al. Second primary cancer after treatment for cervical cancer // *Cancer.* 1995. Vol. 76, No 3. P. 442-52.
15. Baxter N.N., Tepper J.E., Durham S.B., et al. Increased risk of rectal cancer after prostate radiation: a population-based study // *Gastroenterology.* 2005. Vol. 128, No 4. P. 819-24.
16. Richardson D.B., Cardis E., Daniels R.D., et al. Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS) // *BMJ.* 2015; 351:h5359.
17. Hunter N., Kuznetsova I.S., Labutina E.V., Harrison J.D. Solid cancer incidence other than lung, liver and bone in Mayak workers: 1948-2004 // *Br. J. Cancer.* 2013. Vol. 109, No 7. P. 1989-96.
18. Sokolnikov M., Preston D., Gilbert E., et al. Radiation effects on mortality from solid cancers other than lung, liver, and bone cancer in the Mayak worker cohort: 1948-2008 // *PLoS One.* 2015. Vol. 10, No 2. P. e0117784.
19. Napier B.A. The Mayak Worker Dosimetry System (MWDS-2013): an introduction to the documentation // *Radiat. Prot. Dosimetry.* 2017. Vol. 176, No 1-2. P. 6-9.
20. Azizova T.V., Day R.D., Wald N., et al. The "clinic" medical-dosimetric database of Mayak production association workers: structure, characteristics and prospects of utilization // *Health Phys.* 2008. Vol. 94, No 5. P. 449-58.
21. Мерков А.М., Поляков Л.Е. Санитарная статистика (пособие для врачей). М.: Атомиздат, 1975. 245 с.
22. Zar J.H. Biostatistical Analysis. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 663 p.
23. Joinpoint Trend Analysis Software. URL: <https://surveillance.cancer.gov/joinpoint> (дата обращения: 20.03.2020)
24. Каприн А.Д. Злокачественные новообразования в России в 2017 году (заболеваемость и смертность); под ред. Каприна А.Д., Старинского В.В., Петровой Г.В. М: МНИОИ им. П.А. Герцена, 2018. 250 с.

Поступила: 22.03.2020 г.

Жунтова Галина Вадимовна – кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник Южно-Уральского института биофизики Федерального медико-биологического агентства России. **Адрес для переписки:** 456780, Челябинская обл., г. Озерск, Озерское шоссе, д. 19; E-mail: clinic@subi.su

Азизова Тамара Васильевна – кандидат медицинских наук, заместитель директора по науке, заведующая клиническим отделом Южно-Уральского института биофизики Федерального медико-биологического агентства России, Озерск, Россия

Банникова Мария Владимировна – младший научный сотрудник Южно-Уральского института биофизики Федерального медико-биологического агентства России, Озерск, Россия

Заварухина Татьяна Павловна – врач-терапевт, Клиническая больница № 71 Федерального медико-биологического агентства России, Озерск, Россия

Для цитирования: Жунтова Г.В., Азизова Т.В., Банникова М.В., Заварухина Т.П. Динамика показателей заболеваемости раком толстого кишечника в когорте работников, подвергшихся профессиональному облучению // *Радиационная гигиена.* 2020. Т. 13, № 3. С. 18–24. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-18-24

Incidence trend for colorectal cancer in the cohort of workers exposed to ionizing radiation

Galina V. Zhuntova ¹, Tamara V. Azizova ¹, Maria V. Bannikova ¹, Tatiana P. Zavarukhina ²

¹Southern Urals Biophysics Institute at the Federal Medical Biological Agency of Russia, Ozyorsk, Russia

²Clinical hospital №71 at the Federal Medical Biological Agency of Russia, Ozyorsk, Russia

Colorectal cancer is one of the most common malignant neoplasms. Main causes inducing this type of cancer are factors related to the life style and occupational exposures to chemical agents. Some studies demonstrated an association of colorectal cancer incidence and mortality with ionizing radiation. The aim of the present study was to assess the trend in colorectal cancer incidence in a cohort of nuclear workers employed at the Mayak Production Association who had been exposed to ionizing radiation over prolonged periods. The cohort comprised 22,377 workers (25% of females) employed at one of the main plants (reactors, radiochemical and plutonium production plants) of the Mayak Production Association in 1948–1982 who had been externally exposed to gamma rays (cumulative absorbed colon doses were 0–5.85 Gy with the corresponding median dose of 0.16 Gy) and those who had inhaled aerosols containing plutonium particles had been also internally exposed to alpha radiation (cumulative absorbed colon doses were 0–0.18 Gy with the corresponding median dose of 0.0002 Gy). Over the period of 1948–2018, 239 colon cancers and 186 rectum cancers were diagnosed in the study cohort. The incidence of colorectal malignancies among workers of the study cohort was shown to increase with age above 50. Age-standardized incidence rates were higher in males than in females. The time trend analysis of age-standardized rates of colorectal malignancies among workers of the study cohort was performed using a spline regression. The trend of age-standardized rates of colorectal cancer incidence in the Mayak Production Association workers over the analyzed period was nonmonotonic. In general, the average annual percent change of incidence growth for colon cancer was less than 0.1% (for both sexes), while the corresponding estimates for rectum cancer were 1.1% in males and 30.3% in females. To assess the effect of occupational radiation exposure on the incidence of colorectal malignancies, a radiogenic risk analysis that would take into account non-radiation risk factors should be performed.

Key words: colorectal cancer, the Mayak Production Association workers, occupational radiation exposure.

References

1. Bray F, Ferlay J, Soerjomataram I, Siegel RL, Torre LA, Jemal A. Global cancer statistics 2018: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA Cancer J. Clin.* 2018;68(6): 394–424.
2. Kaprin AD, Starinsky VV, Petrova GV. Malignant neoplasms in Russia in 2018 (morbidity and mortality). Eds. Kaprin AD. Moscow: MNIOI named after P.A. Hertsen; 2019. 250 p. (In Russian).
3. Brenner H, Chen C. The colorectal cancer epidemic: challenges and opportunities for primary, secondary and tertiary prevention. *Br. J. Cancer.* 2018;119(7): 785–792.
4. Murphy N, Moreno V, Hughes DJ, Vodicka L, Vodicka P, Aglago EK, et al. Lifestyle and dietary environmental factors in colorectal cancer susceptibility. *Mol. Aspects Med.* 2019;69: 2–9.
5. Carr PR, Weigl K, Jansen L, Walter V, Erben V, Chang-Claude J, et al. Effects of Physical Activity on Risk of Colorectal Cancer: A Case-control Study. *Int. J. Prev. Med.* 2018;155(6): 1805–1815.
6. Doubeni CA, Laiyemo AO, Major JM, Schootman M, Lian M, Park Y, et al. Socioeconomic status and the risk of colorectal cancer: An analysis of over one-half million adults in the NIH-AARP Diet and Health Study. *Cancer.* 2012;118(14): 3636–44.
7. Schumacher FR, Schmit SL, Jiao S, Edlund CK, Wang H, Zhang B, et al. Genome-wide association study of colorectal cancer identifies six new susceptibility loci. *Nat Commun.* 2015;6: 7138.
8. Patel SG, Ahnen DJ. Familial colon cancer syndromes: an update of a rapidly evolving field. *Curr Gastroenterol Rep.* 2012;14(5): 428–38.
9. Eguchi H, Wada K, Prieto-Merino D, Smith DR. Lung, gastric and colorectal cancer mortality by occupation and industry among working-aged men in Japan. *Sci Rep.* 2017;7: 43204.
10. Paris C, Thaon I, Hérin F, Clin B, Lacourt A, Luc A, et al. Occupational Asbestos Exposure and Incidence of Colon and Rectal Cancers in French Men: The Asbestos-Related Diseases Cohort (ARDCo-Nut). *Environ Health Perspect.* 2017;125(3): 409–415.
11. Singh Z, Chadha P. Textile industry and occupational cancer. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology.* 2016;11(39): 1–6.
12. Ozasa K, Shimizu Y, Suyama A, Kasagi F, Soda M, Grant EJ, et al. Studies of the mortality of atomic bomb survivors, Report 14, 1950–2003: an overview of cancer and noncancer diseases. *Radiat Res.* 2012;177(3): 229–43.
13. Preston DL, Ron E, Tokuoka S, Kodama K, et al. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958–1998. *Radiat Res.* 2007;168(1): 1–64.

Galina V. Zhuntova

Southern Urals Biophysics Institute

Address for correspondence: Ozyorskoe shosse, 19, Ozyorsk, Chelyabinsk region, 456780, Russia; E-mail: clinic@subi.su

14. Kleinerman RA, Boice JD Jr, Storm HH, Sørensen P, Andersen A, Pukkala E, et al. Second primary cancer after treatment for cervical cancer. *Cancer*. 1995;76(3): 442-52.
15. Baxter NN, Tepper JE, Durham SB, Rothenberger DA, Virnig BA. Increased risk of rectal cancer after prostate radiation: a population-based study. *Gastroenterology*. 2005;128(4): 819-24.
16. Richardson DB, Cardis E, Daniels RD, Gillies MA, O'Hagan JA, Hamra GB, et al. Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS). *BMJ*. 2015;351: h5359.
17. Hunter N, Kuznetsova IS, Labutina EV, Harrison JD. Solid cancer incidence other than lung, liver and bone in Mayak workers: 1948-2004. *Br J Cancer*. 2013;109 (7): 1989-96.
18. Sokolnikov M, Preston D, Gilbert E, Schonfeld S, Koshurnikova N. Radiation effects on mortality from solid cancers other than lung, liver, and bone cancer in the Mayak worker cohort: 1948-2008. *PLoS One*. 2015;10(2): e0117784.
19. Napier BA. The Mayak Worker Dosimetry System (MWDS-2013): an introduction to the documentation. *Radiat Prot Dosimetry*. 2017;176(1-2): 6-9.
20. Azizova TV, Day RD, Wald N, Muirhead C, O'Hagan JA, Sumina MV, et al. The "clinic" medical-dosimetric database of Mayak production association workers: structure, characteristics and prospects of utilization. *Health Phys*. 2008; 94(5): 449-58.
21. Merkov AM, Polyakov LE. Sanitary statistics (manual for doctors). Moscow: Atomizdat; 1975. 245 p. (In Russian)
22. Zar JH. Biostatistical Analysis. New Jersey: Prentice Hall; 1999. 663 p.
23. Joinpoint Trend Analysis Software. Available from: <https://surveillance.cancer.gov/joinpoint> [Accessed: 20.03.2020]
24. Kaprin AD, Starinsky VV, Petrova GV. Malignant neoplasms in Russia in 2017 (morbidity and mortality). Eds. Kaprin AD. Moscow: MNIOL named after P.A. Hertsen, 2018. 250 p. (In Russian)

Received: March 22, 2020

For correspondence: Galina V. Zhuntova – PhD (medicine), leading researcher, Southern Urals Biophysics Institute affiliated to the Federal Medical Biological Agency of Russia (Ozyorskoe shosse, 19, Ozyorsk, Chelyabinsk region, 456780, Russia; E-mail: clinic@subi.su)

Tamara V. Azizova – PhD (medicine), deputy director for science, head of the clinical department, Southern Urals Biophysics Institute affiliated to the Federal Medical Biological Agency of Russia, Ozyorsk, Russia

Maria V. Bannikova – junior researcher, Federal State Unitary Enterprise Southern Urals Biophysics Institute affiliated to the Federal Medical Biological Agency of Russia, Ozyorsk, Russia

Tatiana P. Zavarukhina – general physician, Federal State Healthcare Institution Clinical hospital No.71 of the Federal Medical Biological Agency of Russia, Ozyorsk, Russia

For citation: Zhuntova G.V., Azizova T.V., Bannikova M.V., Zavarukhina T.P. Incidence trend for colorectal cancer in the cohort of workers exposed to ionizing radiation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No. 3. P. 18-24. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-18-24

Оценка современных уровней ^{241}Am и ^{137}Cs в почве, продуктах питания, доз внутреннего облучения жителей населенных пунктов, прилегающих к зоне отселения Чернобыльской АЭС (на примере Брагинского района Гомельской области Беларуси)

Е.К. Нилова ¹, В.Н. Бортновский ², С.А. Тагай ³, Н.В. Дударева ³, А.Н. Никитин ³

¹ Центр по ядерной и радиационной безопасности, Министерство по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, Минск, Беларусь

² Гомельский государственный медицинский университет, Гомель, Беларусь

³ Институт радиобиологии, Национальная академия наук Беларуси, Гомель, Беларусь

Статья является составной частью цикла исследований по сравнительной оценке современных уровней содержания ^{241}Am и ^{137}Cs в почве и продуктах питания местного производства, а также доз внутреннего облучения жителей населенных пунктов, прилегающих к зоне отселения Чернобыльской АЭС. Целью исследований настоящей работы явилась консервативная оценка ожидаемой годовой дозы внутреннего облучения от ^{241}Am и ^{137}Cs , поступающих в организм с вдыхаемым воздухом и продуктами питания местного производства для жителей частных подворий на примере Брагинского района Гомельской области Беларуси. Фактические данные о современных уровнях содержания радионуклидов в почве были получены для 28 населенных пунктов района, в 2 пунктах с максимальными значениями удельной активности ^{241}Am в почве выполнен отбор и анализ содержания радионуклидов в продуктах питания. Определение ^{241}Am в продуктах выполнялось радиохимическим методом с использованием селективных экстракционно-хроматографических смол и альфа-спектрометрического измерения. Определение ^{241}Am в почве и ^{137}Cs в почве и продуктах выполнялось гамма-спектрометрическим методом. В административном центре района — городском поселке (г.п.) Брагин отмечены наибольшие уровни загрязнения ^{241}Am и ^{137}Cs почвы — до 2,8 и 560 кБк/м² соответственно. Удельная активность ^{241}Am в пробах корне- и клубнеплодов находилась на уровне единиц мБк/кг, а в пробах листовой зелени достигала десятков мБк/кг, при этом содержание ^{241}Am в продуктах было на три порядка величины ниже относительно ^{137}Cs . Результаты оценки показали, что структура ожидаемых доз внутреннего облучения за счет поступления ^{241}Am и ^{137}Cs существенно различается. Максимальная ожидаемая суммарная доза внутреннего облучения ^{137}Cs установлена для жителей Брагина — 1,7 мЗв/год, ^{241}Am — не превышает 0,03 мЗв/год. Максимальные дозы в населенных пунктах района от ингаляционного поступления ^{241}Am варьируют в пределах 0,006—0,033 мЗв/год и превышают на порядок величины дозы от ингаляционного поступления сопутствующего ^{137}Cs (0,0002—0,002 мЗв/год). На современном этапе радиоэкологических последствий катастрофы на ЧАЭС доминирует пероральный путь поступления ^{137}Cs , который может обусловить 93—99% суммарной дозы внутреннего облучения жителей Брагинского района.

Ключевые слова: ^{241}Am , ^{137}Cs , плотность загрязнения почвы, удельная активность, население, продукты питания, ингаляционное поступление, доза внутреннего облучения.

Введение

Катастрофа на Чернобыльской АЭС привела к загрязнению долгоживущими техногенными радионуклидами обширных территорий Европы. Данное загрязнение имеет сложное пространственное распределение [1]. Около 35% чернобыльских выпадений долгоживущего ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30$ лет) пришлось на территорию Республики Беларусь, что обусловило радиоактивное загрязнение 23% ее террито-

рии с уровнями более 37 кБк/м² (1 Ки/км²) [2, 3]. Из 5 административных областей Беларуси самой пострадавшей оказалась Гомельская область, 70% территории которой подверглось радиоактивному загрязнению. По состоянию на начало 2020 г. в зонах радиоактивного загрязнения Республики Беларусь находится 2166 населенных пунктов, из которых 1132 расположены в Гомельской области [4]. В трех южных районах области — Брагинском, Хойникском

Тагай Светлана Алексеевна

Институт радиобиологии

Адрес для переписки: 246000, Беларусь, Гомель, ул. Федюнинского, д. 16; E-mail: lanabuz@tut.by

и Наровлянском в составе радиоактивного загрязнения присутствуют также и заметные активности долгоживущих изотопов трансурановых элементов (ТУЭ) – $^{238,239,240,241}\text{Pu}$ и ^{241}Am . В современный период площади радиоактивного загрязнения радиоактивным цезием чернобыльского происхождения с уровнем загрязнения выше, чем 37 кБк/м^2 , уменьшились почти в 2 раза ввиду снижения уровня загрязнения почв ^{137}Cs , убыль которого за счет его радиоактивного распада составляет 2,3% в год.

^{241}Am ($T_{1/2} = 432,2$ лет) является единственным радионуклидом из состава чернобыльских радиоактивных выпадений, содержание которого в окружающей среде продолжает возрастать ввиду распада ^{241}Pu ($T_{1/2} = 14,3$ лет). К настоящему моменту времени, то есть более чем за два периода полураспада β -излучающего изотопа ^{241}Pu , большая его часть уже превратилась в ^{241}Am . По оценкам доклада Генассамблеи Научного комитета ООН по деятельности атомной радиации (*UNSCEAR 2008*), начальная активность ^{241}Pu в составе выбросов ЧАЭС составляла 2,6 ПБк, а максимальная общая активность ^{241}Am в окружающей среде ожидается в 2058 г. и будет составлять 0,077 ПБк, что в 2 раза превысит количество ^{238}Pu , ^{239}Pu и ^{240}Pu вместе взятых в это же время [5]. В обзорной работе Конопки Е.Ф., Кудряшова В.П. и Миронова В.П. [6] показано, что уже в 2005 г. вклад ^{241}Am в общую активность α -излучающих ТУЭ превысил 50%.

Лидирующая роль ^{241}Am в составе современного чернобыльского загрязнения α -излучающими ТУЭ и продолжительный период полураспада ^{241}Am с испусканием высокоэнергетических α -частиц ($E_{\alpha} = 5485,6 \text{ кэВ}$, $5442,9 \text{ кэВ}$) определяет возрастающую значимость этого радионуклида при возможном его вовлечении в основные пути поступления (ингаляционный и пищевой), ведущие непосредственно к человеку. Поэтому в настоящее время актуальным является уточнение содержания ^{241}Am в сравнении с ^{137}Cs в почве и продуктах питания, а также последующая оценка вклада каждого из радионуклидов в дозы облучения населения, проживающего в загрязненных районах. Решение этой задачи включало ряд этапов, каждый из которых посвящен одному из районов и является темой для отдельной публикации. В первой статье [7] данного цикла работ приводятся предварительные результаты оценки, выполненной для трех населенных пунктов Брагинского района, прилегающих к землям отселения ЧАЭС.

В настоящей работе выполнена оценка для всех обследованных населенных пунктов (н.п.) Брагинского района, включая городской поселок (г.п.) Брагин.

Цель исследования – выполнить оценку доз внутреннего облучения ^{241}Am и ^{137}Cs жителей населенных пунктов на территории Брагинского района Гомельской области Беларуси.

Задачи исследования

1. Провести сравнительный анализ уровней содержания ^{241}Am и ^{137}Cs в почве и продуктах питания местного производства на территории Брагинского района.
2. Оценить вклад ^{241}Am и ^{137}Cs в дозы внутреннего облучения населения, проживающего на территории частного сектора Брагинского района.

Материалы и методы

На территории 103 частных подворий в 28 населенных пунктах Брагинского района Гомельской области Беларуси в период 2017–2018 гг. был произведен отбор проб почвы и продуктов питания местного производства (табл. 1–3). Отбор проб почвы выполняли пробоотборником с грунтоприемной трубой диаметром 3,5 см [8] на глубину пахотного горизонта 20 см, на каждом участке проводили 5 уколов (точечных проб) методом конверта и формировали смешанный образец пробы почвы. Плотность сложения почвы различных участков различна, поэтому в лабораторных условиях определяли объемную плотность каждой пробы почвы. Отбор проб почвы сопровождали измерением мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (МАЭД) на высоте 1 м от поверхности почвы с помощью дозиметра-радиометра МКС-АТ1125 (Атомтех, Минск). Дозиметр-радиометр во время измерения фиксировался в руках оператора; на каждом участке выполняли 5 измерений по методу конверта до статистической неопределенности не выше 20%.

После транспортировки пробы почвы высушивали до воздушно-сухого состояния, помещали в сосуды Маринелли объемом 500 см^3 с фиксированной высотой заполнения измерительного сосуда для обеспечения унифицированной геометрии измерений. Содержание ^{241}Am ($E = 59,6 \text{ кэВ}$) и ^{137}Cs ($E = 661,6 \text{ кэВ}$) в почве определяли методом гамма-спектрометрии с использованием полупроводникового (коаксиального германиевого, серия XtRa) детектора расширенного энергетического диапазона «Canberra-GX3020», параметры измерений приведены в работе [7]. Время измерения составляло от нескольких часов до нескольких суток обратно пропорционально ожидаемой активности ^{241}Am в почве. Для определения удельной активности ^{241}Am по пику полного поглощения $59,6 \text{ кэВ}$ считалась приемлемой погрешность не выше 30%.

Пробы продуктов питания местного производства отбирались на отдельных 7 частных подворьях, где установлено максимальное содержание ^{241}Am в пробах почвы. Продукты отбирались в количестве 1 кг каждого компонента основного рациона питания жителей населенных пунктов [9]: картофель, листовая зелень (салат, петрушка, лук), корнеплоды (свекла, морковь). Пробы клубне- и корнеплодов подвергались анализу после удаления частиц почвы посредством отмывки водой, но без снятия кожуры. Срез проб листовой зелени производился на высоте 2–3 см от поверхности почвы; и далее без процедуры очищения водой пробы направлялись на аналитические измерения. Такая предварительная пробоподготовка обеспечивала соблюдение наиболее консервативного подхода, учитывающего форму потребления населением продуктов, произведенных на личном подворье:

- клубни картофеля и корнеплодов без удаления кожуры («в мундире»);
- листовая зелень после срезки без предварительной обработки водой.

Определение удельной активности ^{137}Cs в пробах продуктов питания выполнялось гамма-спектрометрическим методом; погрешность измерений по пику полного поглощения 661 кэВ не превышала 30%. Определение удельной активности ^{241}Am в пробах продуктов выполня-

Таблица 1
Содержание ^{241}Am в почве подворий населенных пунктов Брагинского района Гомельской области, обследованных в 2017–2018 гг.

[Table 1
 ^{241}Am content in the soil of the farmlands of the Bragin district villages surveyed in the Gomel region in 2017–2018]

№	Населенный пункт [Village]	Кол-во проб (n) [Number of samples]	²⁴¹ Am						Расстояние до ЧАЭС, км [Distance to the Chernobyl NPP, km]
			A _{сред} [Aaver]		A _{мин} [Amin]		A _{макс} [Amax]		
			Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м² [kBq/m²]	Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м² [kBq/m²]	Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м² [kBq/m²]	
1	Брагин [Bragin]	12	10,4	1,6	5,0	0,9	26,9	2,8	46
2	Соболи [Soboli]	8	8,7	1,6	6,5	1,4	16,3	3,6	46
3	Бурки [Burki]	5	4,8	0,9	2,7	0,5	6,5	1,3	47
4	Ковали [Kovali]	4	5,9	1,2	4,6	0,9	8,3	1,4	47
5	Бакуны [Bakuni]	4	3,1	0,6	2,5	0,6	3,7	0,7	48
6	Микуличи [Mikulichi]	7	2,8	0,6	<1,1	<0,2	3,5	0,8	52
7	Маритон [Mariton]	3	3,8	0,7	2,5	0,6	3,6	0,7	56
8	Дублин [Dublin]	5	4,5	1,0	2,1	0,5	5,9	1,4	42
9	Грушное [Grushnoe]	5	4,5	0,8	2,4	0,5	8	0,9	32
10	Савичи [Savichi]	8	3,2	0,7	<0,8	<0,2	3,7	0,7	30
11	Волоховщина [Voloхов]	2	5,8	1,2	5,3	1,0	6,3	1,4	41
12	Ленинец [Leninist]	4	8,5	1,2	4,6	0,8	17,0	1,6	44
13	Шкураты [Shkuraty]	3	2,5	0,6	1,7	0,4	3,2	0,7	52
14	Пожарки [Pozharki]	2	3,1	0,6	<0,7	<0,1	3,1	0,6	52
15	Тельман [Telman]	3	4,4	0,8	3,4	0,6	5,6	1,0	49
16	Малейки [Malejki]	2	6,3	1,1	5,6	0,8	6,9	1,3	48
17	Городище [Gorodishe]	2	6,8	1,2	<0,8	<0,2	6,8	1,2	50
18	Михновка [Mihnovka]	3	2,5	0,6	1,4	0,3	3,1	0,8	57
19	Н. Путь [N. Put]	2	3,9	0,9	3,6	0,8	4,2	0,9	54
20	Рыжков [Rizhkov]	3	2,9	0,7	2,9	0,6	3,0	0,6	56
21	Котловица [Kotloviza]	3	4,7	1,0	3,6	0,8	5,7	1,2	48
22	Н. Мокрец [N. Mokrez]	3	2,5	0,6	1,4	0,4	3,4	0,8	52
23	Кривча [Krivcha]	3	3,9	0,8	3,5	0,8	4,3	0,6	45

Окончание таблицы 1

№	Населенный пункт [Village]	Кол-во проб (n) [Number of samples]	²⁴¹ Am						Расстояние до ЧАЭС, км [Distance to the Chernobyl NPP, km]
			A _{сред} [Aaver]		A _{мин} [Amin]		A _{макс} [Amax]		
			Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м² [kBq/m²]	Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м² [kBq/m²]	Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м² [kBq/m²]	
24	Н. Гребля [N. Greblya]	2	2,8	0,6	2,8	0,5	2,8	0,6	37
25	Гдень [Gden]	6	3,2	0,8	<1,2	<0,3	4,0	1,1	24
26	Кр. Гора [Kr. Gora]	1	7,6	1,1					44
27	Дубровное [Dubrovnoe]	1	3,9	0,8					46
28	Ч. Поле [Ch. Pole]	1	3,2	0,8					55

Таблица 2

Содержание ¹³⁷Cs в почве подворий населенных пунктов Брагинского района Гомельской области, обследованных в 2017–2018 гг.

[Table 2]

¹³⁷Cs content in the soil of the farmlands of the Bragin district villages surveyed in the Gomel region in 2017–2018

№	Населенный пункт [Village]	Кол-во проб (n) [Number of samples]	МАЭД		¹³⁷ Cs					
			мин	макс	A _{сред}		A _{мин}		A _{макс}	
			мкЗв/ч		Бк/кг	кБк/м ²	Бк/кг	кБк/м ²	Бк/кг	кБк/м ²
			[ADER]		[A _{aver}]		[A _{min}]		[A _{max}]	
			[min]	[max]	Bq/kg	kBq/m ²	Bq/kg	kBq/m ²	Bq/kg	kBq/m ²
			[μSv/h]							
1	Брагин [Bragin]	12	0,11	0,37	1768	282	825	101	2992	560
2	Соболи [Soboli]	8	0,11	0,26	1182	219	529	116	1630	296
3	Бурки [Burki]	5	0,12	0,13	678	129	587	95	800	158
4	Ковали [Kovali]	4	0,13	0,16	831	171	662	134	937	213
5	Бакуны [Bakuni]	4	0,13	0,16	698	112	580	114	805	150
6	Микуличи [Mikulichi]	7	0,13	0,25	1252	226	551	117	2126	350
7	Маритон [Mariton]	3	0,11	0,13	562	108	523	79	629	123
8	Дублин [Dublin]	5	0,09	0,12	370	81	234	54	462	94
9	Грушное [Grushnoe]	5	0,08	0,09	271	46	172	39	500	56
10	Савичи [Savichi]	8	0,09	0,14	422	90	75	16	786	181
11	Волоховщина [Voloхов]	2	0,11	0,13	655	91	648	146	662	125
12	Ленинец [Leninist]	4	0,14	0,22	1524	224	928	149	2524	237
13	Шкураты [Shkuraty]	3	0,08	0,09	261	64	167	41	324	72
14	Пожарки [Pozharki]	2	0,09	0,13	438	81	139	28	737	133
15	Тельман [Telman]	3	0,09	0,11	323	65	363	63	474	88

Окончание таблицы 2

№	Населенный пункт [Village]	Кол-во проб (n) [Number of samples]	МАЭД		¹³⁷ Cs					
			мин	макс	A _{сред}		A _{мин}		A _{макс}	
			мкЗв/ч		Бк/кг	кБк/м ²	Бк/кг	кБк/м ²	Бк/кг	кБк/м ²
			[ADER]		[A _{aver}]		[A _{min}]		[A _{max}]	
			[min]	[max]	Bq/kg	kBq/m ²	Bq/kg	kBq/m ²	Bq/kg	kBq/m ²
			[μSv/h]							
16	Малейки [Malejki]	2	0,08	0,10	438	74	346	48	530	100
17	Городище [Gorodishe]	2	0,08	0,09	327	72	62	15	342	60
18	Михновка [Mihnovka]	3	0,06	0,09	212	36	189	45	256	67
19	Н. Путь [N. Put]	2	0,08	0,09	323	71	303	71	342	72
20	Рыжков [Rizhkov]	3	0,09	0,11	406	95	362	77	452	85
21	Котловица [Kotloviza]	3	0,07	0,09	267	44	206	48	364	73
22	Н. Мокрец [N. Mokrez]	3	0,05	0,06	146	33	100	28	190	47
23	Кривча [Krivcha]	3	0,07	0,08	176	62	184	41	298	71
24	Н. Гребля [N. Greblya]	2	0,06	0,06	239	47	224	44	254	50
25	Гдень [Gden]	6	0,05	0,06	160	38	82	19	249	53
26	Кр. Гора [Kr. Gora]	1	0,16	0,17	1471	211				
27	Дубровное [Dubrovnoe]	1	0,15	0,16	1016	203				
28	Ч. Поле [Ch. Pole]	1	0,10	0,11	85	462				

Таблица 3

Содержание ²⁴¹Am и ¹³⁷Cs в продуктах питания подворий г.п. Брагин и н.п. Соболи
Брагинского района Гомельской области

[Table 3]

²⁴¹Am and ¹³⁷Cs contents in the foodstuffs of the farmlands of the settlements Braagin and Soboli, the Braagin district,
the Gomel region]

Населенный пункт [Village]	Продукт [foodstuffs]	¹³⁷ Cs*	²⁴¹ Am*	¹³⁷ Cs KH**	²⁴¹ Am KH**
		Бк/кг [Bq/kg]	мБк/кг [mBq/kg]	[¹³⁷ Cs F _v]	[²⁴¹ Am F _v]
Брагин 1 [Braagin 1]	Картофель [Potatoes]	2,8±0,4	1,1±0,3	0,0102	0,0005
Брагин 2 [Braagin 2]	Картофель [Potatoes]	0,5±0,2	0,8±0,2	0,0011	0,0003
Брагин 3 [Braagin 3]	Картофель [Potatoes]	<0,5	1,8±0,4	<0,0014	0,0009
	Картофель [Potatoes]	0,6±0,2	1,1±0,3	0,0010	0,0007
	Морковь [Carrot]	9,9±1,9	4,4±1,2	0,0221	0,0039
	Свекла [Beet]	5,1±1,2	6,9±1,3	0,0114	0,0061
Брагин 4 [Braagin 4]	Листовая петрушка [Leaf parsley]	6,6±1,3	8,0±2,0	0,0428	0,0160
	Листовой салат [Leaf salad]	3,7±0,9	3,4±0,7	0,0215	0,0013
	Перо лука [Onion feather]	1,5±0,4	3,0±0,9	0,0097	0,0060

Населенный пункт [Village]	Продукт [foodstuffs]	¹³⁷ Cs*	²⁴¹ Am*	¹³⁷ Cs KH**	²⁴¹ Am KH**
		Бк/кг [Bq/kg]	мБк/кг [mBq/kg]	[¹³⁷ Cs F _v]	[²⁴¹ Am F _v]
Брагин 5 [Bragin 5]	Картофель [Potatoes]	4,6±0,8	6,0±1,1	0,0134	0,0011
	Морковь [Carrot]	1,8±0,5	2,7±0,8	0,0070	0,0007
	Свекла [Beet]	13,9±1,8	8,5±2,0	0,0539	0,0021
	Листовая петрушка [Leaf parsley]	4,2±1,2	8,6±2,0	0,0244	0,0032
	Листовой салат [Leaf salad]	40,2±5,4	10,2±2,1	0,2607	0,0204
	Перо лука [Onion feather]	1,8±0,9	5,7±1,4	0,0105	0,0021
Соболи 4 [Soboli 4]	Картофель [Potatoes]	3,8±0,9	2,0±0,5	0,0191	0,0011
	Листовой салат [Leaf salad]	3,3±1,1	13,1±2,5	0,0296	0,0142
	Перо лука [Onion feather]	2,7±0,9	2,8±0,8	0,0242	0,0030
	Свекла [Beet]	2,7±0,4	3,7±0,7	0,0110	0,0034
Соболи 5 [Soboli 5]	Картофель [Potatoes]	2,8±0,4	5,1±1,0	0,0086	0,0035
	Листовая петрушка [Leaf parsley]	11,7±2,2	33,3±6,0	0,0872	0,0204
	Листовой салат [Leaf salad]	3,2±1,2	19,6±3,1	0,0279	0,0276
	Перо лука [Onion feather]	2,9±0,9	3,0±0,8	0,0253	0,0042

*Удельная активность радионуклидов в продуктах определена на натуральную массу. [The specific activity of radionuclides in the products is determined by the natural weight].

** Коэффициент накопления или концентрационное отношение (KH). Отношение активности радионуклида в единице сухого веса растений Бк·кг⁻¹ к активности в сухой почве Бк·кг⁻¹. Безразмерный параметр [Transfer factor or Concentration ratio (F_v). The ratio of the activity concentration of radionuclide in the plant (Bq kg⁻¹ dry weight) to that in the soil (Bq kg⁻¹ dry weight). Dimensionless].

лось методом комплексной радиохимической очистки с последующим альфа-спектрометрическим анализом. Алгоритм радиохимической процедуры включал очистку ²⁴¹Am с использованием селективных смол TRU-TEVA-Spec Resin и представлен в работе [7]. Погрешность определения ²⁴¹Am с введенной меткой ²⁴³Am не превышала 30%. Минимально-детектируемая активность (МДА) ²⁴¹Am в пробах продуктов зависела от зольного остатка пробы и не превышала 0,001 Бк /пробу.

Результаты и обсуждение

Результаты определения удельной активности и плотности загрязнения ²⁴¹Am и ¹³⁷Cs в почве подворий Брагинского района обобщены в таблицах 1–2, удельная активность радионуклидов в почве приведена на воздушно-сухую массу. В качестве дополнительных характеристик в таблице 1 указано кратчайшее расстояние до ЧАЭС, а в таблице 2 приведен диапазон МАЭД на частных

подворьях этих н.п. Расположение обследованных н.п. относительно ЧАЭС и границ зоны отчуждения (Полесский государственный радиационно-экологический заповедник) представлено на рисунке 1. При этом как в таблицах 1–2, так и на рисунке 1 сохранены одни и те же порядковые номера населенных пунктов.

Как сообщалось в первой работе настоящего исследования [7], статистический анализ представленных в таблицах 1–2 результатов свидетельствует об отсутствии значимой корреляции между загрязнением ²⁴¹Am, ¹³⁷Cs почвы и расстоянием до ЧАЭС, а также между загрязнением почвы ²⁴¹Am и ¹³⁷Cs для исследованных 28 н.п. Брагинского района (см. рис. 1). Наибольшее загрязнение радионуклидами почвенного покрова отмечается в г.п. Брагин (№1), удаленном от ЧАЭС в северо-восточном направлении на расстояние 46 км. Здесь зафиксированы максимальные уровни удельной активности радионуклидов в почве подворий, а с учетом объемной плотности

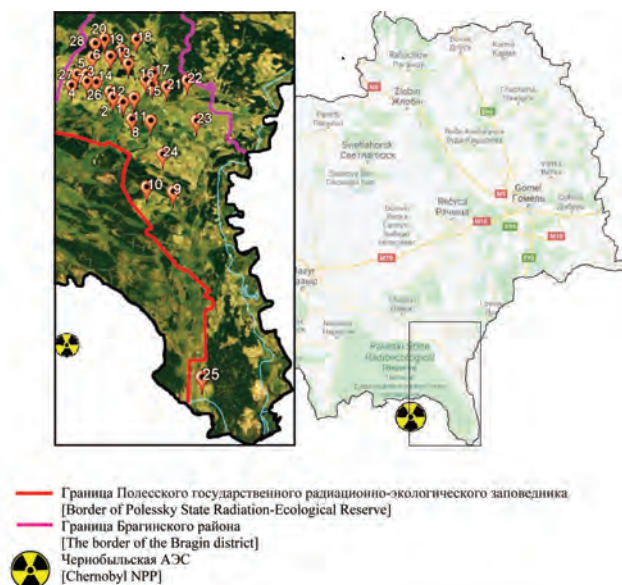


Рис. 1. Расположение населенных пунктов Брагинского района Гомельской области относительно зоны отчуждения (Полесский государственный радиационно-экологический заповедник) и ЧАЭС

[Fig. 1. Position of Bragin area settlements (Gomel region) relative to the exclusion zone (Polesie State Radiation and Ecology Reserve) and the Chernobyl Nuclear Power Plant]

сложения почвы плотность загрязнения ^{241}Am и ^{137}Cs достигает 2,8 и 560 кБк/м^2 соответственно. При этом самый южный н.п. района – Гдень (№ 25), расположенный на удалении 24 км в восточном направлении от ЧАЭС, характеризуется наименьшими значениями данных показателей – до 1,1 и 53 кБк/м^2 по ^{241}Am и ^{137}Cs соответственно. Таким образом, представленные в таблицах 1–2 и на рисунке 1 данные наглядно подтверждают существенную неравномерность радиоактивных выпадений на примере Брагинского района Гомельской области. В более отдаленных от ЧАЭС н.п. северной части района отмечаетсякратно большее загрязнение радионуклидами в сопоставлении с южной частью района.

Установлено, что значения МАЭД на приусадебных участках 28 н.п. Брагинского района находились в диапазоне от 0,05 до 0,37 мкЗв/ч (см. табл. 2). При этом самые высокие показатели МАЭД отмечены именно в г.п. Брагин. Этот вывод согласуется с результатами регулярных измерений в пунктах постоянного контроля Республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды Беларуси [10]. Между МАЭД и плотностью загрязнения ^{137}Cs (см. табл. 2) наблюдается достаточно сильная линейная взаимосвязь (рис. 2) – коэффициент корреляции составляет 0,85.

В то же время корреляция между МАЭД (см. табл. 2) и плотностью загрязнения ^{241}Am (см. табл. 1) отсутствует. Внешнее облучение ^{241}Am , обусловленное низкоэнергетическими γ -квантами ($E=59,6$ кэВ), в условиях реального чернобыльского загрязнения нивелируется на фоне продолжающей оставаться более высокой (на 2–4 порядка величины) активности ^{137}Cs ($E=661$ кэВ). Полученные результаты подтверждают, что на современном этапе ^{137}Cs является основным радионуклидом, определя-

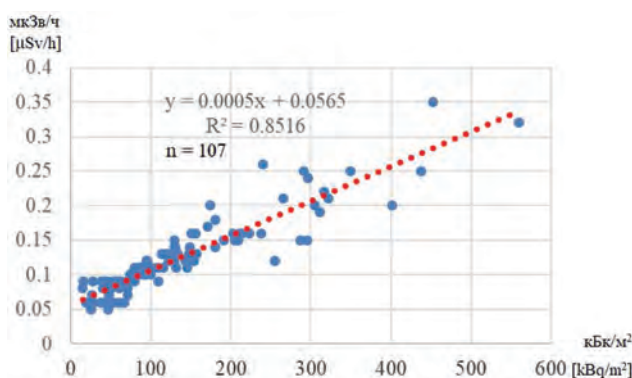


Рис. 2. Соотношение между измеренной мощностью амбиентного эквивалента дозы и экспериментально установленной плотностью загрязнения ^{137}Cs на частных подворьях Брагинского района в 2017–2018 гг.

[Fig. 2. Relationship between measured ambient dose equivalent rate and experimentally determined ^{137}Cs content in the soil of the farmlands of the Bragin district villages in 2017–2018]

щим техногенную составляющую мощности дозы гамма-излучения в воздухе на загрязненных территориях. Полученные результаты также согласуются с данными работы В.П. Рамзаева и А.Н. Барковского [11], в которой при обследовании радиоактивно загрязненных лугов и лесов в юго-западных районах Брянской области спустя 30 лет после Чернобыльской аварии было установлено, что ^{137}Cs являлся доминирующим источником гамма-излучения, а вклад природных радионуклидов в мощность дозы был равен в среднем 3%.

По результатам обследования и анализа данных 28 н.п. Брагинского района были выделены два пункта – г.п. Брагин (№1) и н.п. Соболи (№2), где отмечены наибольшие уровни содержания ^{241}Am в почве (см. табл. 1). На приусадебных участках указанных пунктов были отобраны продукты питания для установления содержания в них ^{241}Am , а также ^{137}Cs (см. табл. 3). Удельная активность ^{241}Am и ^{137}Cs в растительной продукции, выращиваемой населением на личных подворьях н.п. Соболи, была представлена в первой работе данного исследования [7]. Было показано, что максимальной удельной активностью ^{241}Am в продуктах питания на уровне 10–30 мБк/кг продукта при естественной влажности характеризовались пробы листовой зелени петрушки и салата, при этом содержание ^{137}Cs в пробах данной растительной продукции на три порядка величины превышало содержание ^{241}Am . В настоящей работе также представлены результаты определения удельной активности ^{241}Am и ^{137}Cs в растительной продукции, получаемой населением на личных подворьях г.п. Брагин (см. табл. 3). Метод селективной радиохимической очистки позволил выделить ^{241}Am из зольных остатков проб и количественно определить содержание этого радионуклида в продуктах с пересчетом на натуральную массу.

Результаты таблицы 3 свидетельствуют, что аналогично картине загрязнения продуктов в н.п. Соболи [7], содержание ^{241}Am в г.п. Брагин во всех пробах продуктов на три порядка величины ниже (размерность мБк/кг), чем сопутствующего ^{137}Cs (размерность Бк/кг). Установлено,

что удельная активность ^{241}Am в пробах корне- и клубнеплодов, произведенных на отдельных частных подворьях г.п. Брагин, находится на уровне единиц мБк/кг, а в пробах листовой зелени может достигать десятков мБк/кг. Согласно известным литературным данным, основное содержание ^{241}Am в пробах корне- и клубнеплодов может присутствовать в кожуре этих культур [12, 13], а листовая поверхность в пробах зеленных культур является носителем как поверхностного, так и корневого загрязнения [14–17].

В таблице 3 также представлены параметры перехода ^{137}Cs и ^{241}Am (КН – коэффициенты накопления) для продуктов, которые представляют собой концентрационные отношения удельной активности радионуклида в растительном продукте к удельной активности в почве (в международных публикациях принят безразмерный аналог F_v – concentration ratio) [21, 22]. Коэффициенты накопления каждой группы растительных продуктов местного производства Брагинского района варьируют в пределах одного порядка величины и находятся в следующих диапазонах:

- для ^{137}Cs клубнеплоды (картофель) – 0,001–0,019, корнеплоды (свекла, морковь) – 0,007–0,054, зеленные листовые культуры (петрушка, салат, перо лука) – 0,01–0,26;

- для ^{241}Am картофель – 0,0003–0,0035, корнеплоды – 0,0007–0,0061, зеленные листовые культуры – 0,0013–0,0276.

КН для ^{137}Cs в большинстве продуктов на порядок величины превышают таковые для ^{241}Am . Сравнение полученных параметров перехода ^{137}Cs с данными справочника МАГАТЭ IAEA-TRS-472 показывает, что полученные параметры попадают в диапазон справочных данных, который является более широким и варьирует в пределах нескольких порядков величины. Следует отметить, что максимальные полученные КН ^{241}Am для листовых культур (0,0276) и корнеплодов (0,0061) превышают максимальные значения справочника (листовые – 0,0015, корнеплоды – 0,0017), а максимальный полученный КН ^{241}Am для картофеля (0,0035), наоборот, в 10 раз меньше максимального справочного параметра для клубнеплодов (0,034). Поэтому применение уточненных параметров перехода ^{241}Am для продуктов местного производства Брагинского района позволяет в целом снизить неопределенность дальнейшей оценки вклада данного радионуклида в дозы внутреннего облучения.

Оценка вклада ^{241}Am и ^{137}Cs в дозы внутреннего облучения населения, проживающего на территории частного сектора Брагинского района, выполнена, как и представлено в предыдущей работе на примере одного из подворий в н.п. Соболи [7], на основании фактических данных об уровнях современного загрязнения ^{241}Am и ^{137}Cs почвы и продуктов питания, получаемых жителями на личном подворье, в соответствии с рекомендациями [18–20] (табл. 4). В расчетах оценки ожидаемой дозы внутреннего облучения от поступающих по пищевой цепочке радионуклидов также консервативно принималось, что все основные компоненты рациона (картофель, зелень, овощи, фрукты и ягоды, молоко, мясо, яйца) население получает на личном подворье, при этом учитывались полученные экспериментальным путем наибольшие коэффициенты накопления радионуклидов из почвы в продукты, харак-

теризующие рассматриваемый регион. При отсутствии данных о содержании радионуклидов в продукте ввиду низких активностей использовались расчетные данные с учетом максимальных концентрационных соотношений в соответствии с международным справочником IAEA-TRS-472 [21, 22]. Для оценки ингаляционного пути поступления контролируемых радионуклидов были использованы установленные ранее коэффициенты ресуспензии [23, 24], характеризующие влияние сельскохозяйственных операций при выполнении населением полевых работ в загрязнение приземного воздуха радионуклидами. Расчет ожидаемой годовой дозы внутреннего облучения при поступлении радионуклидов с вдыхаемым воздухом произведен в предположении, что жители подворья выполняют пылеобразующие сельскохозяйственные работы на приусадебном участке 4 ч в день (2 ч утром, 2 ч вечером – согласно опросам населения) в течение 7 месяцев.

Результаты оценки доз внутреннего облучения жителей н.п. Брагинского района Гомельской области Беларуси (см. табл. 4) при производстве и потреблении продуктов питания на личном подворье свидетельствуют, что максимальные эффективные дозы от ингаляционного поступления ^{241}Am варьируют в пределах 0,006–0,033 мЗв/год и как минимум на один порядок величины превышают таковые дозы от ингаляционного поступления ^{137}Cs (0,0002–0,002 мЗв/год).

В структуре ожидаемой дозы внутреннего облучения от ^{241}Am населения всех н.п. Брагинского района преобладает ингаляционная составляющая, которая в 10 и более раз может превышать дозу облучения от поступления этого радионуклида пероральным путем. В то же время ожидаемая доза внутреннего облучения населения от ^{137}Cs практически на 100% формируется пероральным путем, а ингаляционная составляющая в годовой дозе внутреннего облучения жителей от данного радионуклида не превышает 0,2%. Максимальная ожидаемая доза внутреннего облучения от ^{137}Cs установлена для жителей г.п. Брагин и составляет 1,7 мЗв/год, при этом максимальная доза внутреннего облучения от ^{241}Am не превышает 0,03 мЗв/год (см. табл. 4). Иная ситуация в н.п. Гдень (№ 25), где при значительно меньших ожидаемых дозах внутреннего облучения от ^{241}Am (0,011 мЗв/год) и ^{137}Cs (0,15 мЗв/год), относительный вклад ^{241}Am в суммарную дозу облучения больше по сравнению с г.п. Брагин (№ 1). Очевидно, что и в других н.п. Брагинского района при снижении со временем уровней загрязнения ^{137}Cs вклад ^{241}Am в суммарную дозу облучения населения будет возрастать.

Таким образом, установленные уровни содержания ^{241}Am в почве н.п. Брагинского района могут обусловить 90–98% ожидаемой дозы внутреннего облучения жителей за счет ингаляционного поступления суммы радионуклидов ^{241}Am и ^{137}Cs при выполнении полевых работ на приусадебных участках. Структура дозы внутреннего облучения за счет поступления ^{137}Cs существенно отличается от дозовой структуры ^{241}Am . На современном этапе доминирует пероральный путь поступления ^{137}Cs , который может обусловить 93–99% суммарной дозы внутреннего облучения жителей Брагинского района. Установленные уровни присутствия ^{241}Am в продуктах питания местного производства, которые население получает на своих участках, могут принести не более 0,3% в дозу внутреннего облучения от поступления суммы радионуклидов ^{241}Am и ^{137}Cs пероральным путем.

Таблица 4

Оценка максимальной ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения от ^{241}Am и ^{137}Cs для подворий Брагинского района Гомельской области, мЗв/год

[Table 4]

Assessment of the maximum expected effective internal dose from ^{241}Am and ^{137}Cs at the farmlands of Bragin district, Gomel region, mSv/ year]

№	Населенный пункт [Village]	^{137}Cs			^{241}Am		
		пищевая цепочка [food chain]	ингаляция [inhalation]	сумма [total]	пищевая цепочка [food chain]	ингаляция [inhalation]	сумма [total]
1	Брагин [Bragin]	1,70	0,0020	1,702	0,0013	0,027	0,028
2	Соболи [Soboli]	0,95	0,0011	0,951	0,0013	0,033	0,034
3	Бурки [Burki]	0,47	0,0006	0,471	0,0005	0,012	0,013
4	Ковали [Kovali]	0,55	0,0008	0,551	0,0007	0,013	0,014
5	Бакуны [Bakuni]	0,47	0,0005	0,471	0,0003	0,008	0,008
6	Микуличи [Mikulichi]	1,20	0,0011	1,201	0,0003	0,009	0,009
7	Маритон [Mariton]	0,37	0,0004	0,370	0,0004	0,006	0,007
8	Дублин [Dublin]	0,27	0,0003	0,270	0,0005	0,013	0,014
9	Грушное [Grushnoe]	0,30	0,0002	0,300	0,0006	0,011	0,012
10	Савичи [Savichi]	0,47	0,0006	0,471	0,0004	0,011	0,011
11	Волоховщина [Volohov]	0,40	0,0005	0,401	0,0005	0,012	0,013
12	Ленинец [Leninist]	1,50	0,0011	1,501	0,0013	0,014	0,015
13	Шкураты [Shkuraty]	0,19	0,0003	0,190	0,0003	0,007	0,007
14	Пожарки [Pozharki]	0,44	0,0005	0,441	0,0003	0,006	0,006
15	Тельман [Telman]	0,29	0,0003	0,290	0,0004	0,009	0,009
16	Малейки [Malejki]	0,32	0,0004	0,320	0,0005	0,012	0,013
17	Городище [Gorodishe]	0,21	0,0002	0,210	0,0005	0,011	0,012
18	Михновка [Mihnovka]	0,15	0,0002	0,150	0,0002	0,007	0,007
19	Н. Путь [N. Put]	0,21	0,0003	0,210	0,0003	0,008	0,008
20	Рыжков [Rizhkov]	0,27	0,0004	0,270	0,0003	0,008	0,008
21	Котловица [Kotloviza]	0,22	0,0003	0,220	0,0005	0,011	0,012
22	Н. Мокрец [N. Mokrez]	0,12	0,0002	0,120	0,0003	0,008	0,008
23	Кривча [Krivcha]	0,18	0,0003	0,180	0,0004	0,010	0,010
24	Н. Гребля [N. Greblya]	0,15	0,0002	0,150	0,0002	0,006	0,006
25	Гдень [Gden]	0,15	0,0002	0,150	0,0004	0,011	0,011
26	Кр. Гора [Kr. Gora]	0,86	0,0008	0,861	0,0006	0,011	0,012

№	Населенный пункт [Village]	¹³⁷ Cs			²⁴¹ Am		
		пищевая цепочка [food chain]	ингаляция [inhalation]	сумма [total]	пищевая цепочка [food chain]	ингаляция [inhalation]	сумма [total]
27	Дубровное [Dubrovnoe]	0,60	0,0007	0,601	0,0003	0,008	0,008
28	Ч. Поле [Ch. Pole]	0,28	0,0003	0,280	0,0004	0,008	0,008

Результаты опроса жителей н.п. Брагинского района свидетельствуют о том, что в настоящий период времени производством мясо-молочной продукции на своих приусадебных участках занимаются только единичные подсобные хозяйства. Поэтому можно заключить, что реальная доза от поступления радионуклидов по пищевой цепочке у жителей большинства обследованных н.п. будет меньше, чем консервативно оцененная доза (см. табл. 4). При надлежащем соблюдении гигиенических требований отмытые зеленные культуры и очищенные от кожуры корне-клубнеплоды могут сократить нежелательное поступление альфа-излучающего ²⁴¹Am в рацион жителей по пищевой цепочке. Кроме того, ограничение полевых работ на частном подворье с большим пылеобразованием (работа на пересохшей почве) может являться также дополнительным резервом для сокращения поступления радионуклидов в организм жителей ингаляционным путем.

Заключение

Получены актуальные данные по содержанию ²⁴¹Am и ¹³⁷Cs в почве и продуктах питания местного производства на приусадебных участках 28 населенных пунктов Брагинского района Гомельской области.

Наибольшее загрязнение радионуклидами отмечается в административном центре района – г.п. Брагин, где плотность загрязнения ²⁴¹Am и ¹³⁷Cs достигает 2,8 и 560 кБк/м² соответственно. Самый южный в районе н.п. Гдень характеризуется наименьшим загрязнением почвы техногенными радионуклидами – до 1,1 и 53 кБк/м² по ²⁴¹Am и ¹³⁷Cs соответственно. Значения МАЭД на приусадебных участках Брагинского района находились в диапазоне от 0,05 до 0,37 мкЗв/ч, между МАЭД и плотностью загрязнения ¹³⁷Cs подтверждена корреляционная связь, которая отсутствует для ²⁴¹Am.

Установлено, что удельная активность ²⁴¹Am в г.п. Брагин во всех пробах продуктов на три порядка величины ниже, чем ¹³⁷Cs. Удельная активность ²⁴¹Am в пробах корне- и клубнеплодов, произведенных на отдельных частных подворьях г.п. Брагин, находится на уровне единиц мБк/кг, а в пробах листовой зелени может достигать десятков мБк/кг.

На основании фактических данных об уровнях современного загрязнения ²⁴¹Am и ¹³⁷Cs почвы и продуктов питания выполнена оценка вклада данных радионуклидов в дозы внутреннего облучения населения, проживающего в частном секторе Брагинского района с учетом поступления радионуклидов ингаляционным и пероральным путями. Максимальные дозы от ингаляционного поступления ²⁴¹Am варьируют в пределах 0,006–0,033 мЗв/год и пре-

вышают на порядок величины дозы от поступления ¹³⁷Cs с вдыхаемым воздухом (0,0002–0,002 мЗв/год).

Максимальная ожидаемая доза внутреннего облучения от ¹³⁷Cs установлена для жителей г.п. Брагин – 1,7 мЗв/год, при этом максимальная доза внутреннего облучения от ²⁴¹Am не превышает 0,03 мЗв/год.

В целом, на современном этапе доминирует пероральный путь поступления ¹³⁷Cs, который может обусловить 93–99% дозы внутреннего облучения жителей Брагинского района.

Соблюдение гигиенических требований при употреблении продуктов питания местного производства, а также ограничение полевых работ в засушливый период может способствовать сокращению поступления радионуклидов в организм и снижению ожидаемой дозы внутреннего облучения жителей.

Благодарность

Авторы выражают благодарность научным сотрудникам ГНУ «Институт радиобиологии НАН Беларуси» Л.В. Жуковой, Т.В. Ласько, М.В. Фирсаковой, В.А. Касьянчику за участие в выполнении работ на этапах проведения измерений содержания радионуклидов в образцах, их отбора и подготовки к анализу.

Авторы благодарны рецензентам за ценные замечания и рекомендации, которые помогли существенно улучшить качество статьи и позволили увидеть перспективу для дальнейшего развития данного направления исследований.

Литература

1. International Atomic Energy Agency (IAEA) The International Chernobyl Project, Technical report: Assessment of radiological consequences and evaluation of protective measures: Report by an International Advisory Committee. Vienna: IAEA, 1991, ISBN 92-0-129191-4. 640 p.
2. Беларусь и Чернобыль: 34 года спустя. Информационно-аналитические материалы. Департамент по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. Минск: ИВЦ Минфина, 2020. 38 с.
3. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия-Беларусь). Под ред. Ю.А. Изразля и И.М. Богдевича. Москва-Минск: Фонд «Инфосфера»; НИА-Природа, 2009. 140 с.
4. Сколько населенных пунктов находится в зонах радиоактивного загрязнения в результате чернобыльской катастрофы? <https://chernobyl.mchs.gov.by/novosti/2020-04-01-304098/> (Дата обращения 28.05.2020).
5. UNSCEAR 2008. Effects of Ionizing Radiation. Volume II: Report to the General Assembly, Scientific Annexes C, D and E. United Nations Scientific Committee on the Effects of

- Atomic Radiation. New York: United Nations, 2011. 219 p.
6. Конопля Е.Ф., Кудряшов В.П., Миронов В.П. Радиация и Чернобыль: Трансурановые элементы на территории Беларуси. Гомель: РНИУП «Институт радиологии», 2007. 128 с.
 7. Нилова Е.К., Бортновский В.Н., Тагай С.А., и др. ^{241}Am на территориях, прилегающих к белорусскому сектору зоны отселения Чернобыльской АЭС: загрязнение почв, продуктов питания и оценка доз внутреннего облучения населения // Радиационная гигиена. 2019. Т.12, № 2 (спецвыпуск). С. 75-82. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12s-75-82.
 8. Булавик И.М., Переволоцкий А.Н., Дударева Н.В., Тагай С.А. Патент № 3793 Респ. Беларусь, МПК G01N1/04. Пробоотборник для послойного извлечения образцов грунта: пат. на полезную модель; опубл. 30.08.07 // Афіцыйны бюл. Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2007. № 4(57). С. 231-232.
 9. Потребление продуктов питания в домашних хозяйствах. Национальный статистический комитет Республики Беларусь: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/solialnaya-sfera/uroven-zhizni-naseleniya/dokhody-i-potrebleniye-domashnikh-khozyaystv/operativnye-dannye/potrebleniye-osnovnykh-produktov-pitaniya-v-domashnikh-khozyaystvakh/> (Дата обращения: 31.05.2020).
 10. Радиационно-экологическая обстановка в Республике Беларусь: <http://rad.org.by/news/radiacionno-ekologicheskaya-obstanovka-v-respublike-belarus.html> (Дата обращения 28.05.2020).
 11. 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
 12. Popplewell D.S., Ham G.J., Johnson T.E., et al. The uptake of plutonium-238, 239, 240, americium-241, strontium-90 and caesium-137 into potatoes // Science of the Total Environment. 1984. Vol. 38. P. 173-181.
 13. Аппли Л.Дж., и др. Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде. Радиоэкология после Чернобыля; пер. с англ., под ред. Уорнера Ф. и Харрисона Р. М.: Мир, 1999. 512 с.
 14. Павлоцкая Ф.И., Ю.И. Пospelов, Б.Ф. Мясоедов, и др. Поведение трансплутониевых элементов в окружающей среде // Радиохимия. 1991. № 5. С. 112-119.
 15. Аверин В.С., Подоляк А.Г., Тагай С.А., и др. Америций и плутоний в агроэкосистемах. Чернобыльская катастрофа 1986 года. РНИУП «Институт радиологии». Мн., 2014. 176 с.
 16. Romney E.M., Wallace A., Schulz R.K., et al. Plant uptake of ^{237}Np , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{241}Am , and ^{244}Cm from soils representing major food production areas of the United States // Soil Science. 1981. Vol. 132, No. 1. P. 40-59. DOI: 10.1097/00010694-198107000-00007
 17. Bunzl K., Kracke W. Soil to plant transfer of $^{239+240}\text{Pu}$, ^{238}Pu , ^{241}Am , ^{137}Cs and ^{90}Sr from global fallout in flour and bran from wheat, rye, barley and oats, as obtained by field measurements // Science of the Total Environment. 1987. Vol. 63, No. C. P. 111-124. DOI: doi.org/10.1016/0048-9697(87)90040-4.
 18. International Atomic Energy Agency (IAEA) Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards: general safety requirements. Interim edition. Vienna: IAEA, 2011. 303 p.
 19. International Atomic Energy Agency (IAEA) IAEA-TECDOC-1162. Generic procedures for assessment and response during a radiological emergency: updating IAEA-TECDOC-1162. Vienna: IAEA, 2000. 194 p.
 20. International Atomic Energy Agency (IAEA) Safety Standards for protecting people and environment. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements. Part 3 No GSR Part 3. Vienna: IAEA, 2014. 436 p.
 21. International Atomic Energy Agency (IAEA) Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments/Technical Reports Series. TRS-472.Vienna: IAEA, 2010. 208 p.
 22. International Atomic Energy Agency (IAEA) Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments / IAEA-TECDOC-1616.Vienna: IAEA, 2009. 307 p.
 23. Подоляк А.Г., Тагай С.А., Аверин В.С., и др. Дозы облучения работников при проведении сельскохозяйственных операций на загрязнённой радионуклидами (^{137}Cs , ^{241}Am и $^{238,239+240}\text{Pu}$) территории // Радиация и риск. 2014. Том 23, № 2. С.85-93.
 24. Podolyak A., Tagai S., Nilova E., Averin V. Assessment of committed doses received by agricultural workers in grain harvesting operations in the areas of radioactive contamination // Radioprotection. 2017. Vol. 52, No. 1. P. 37-43.

Поступила: 20.06.2020 г.

Нилова Екатерина Константиновна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Центр по ядерной и радиационной безопасности Министерства чрезвычайных ситуаций Республики Беларусь, Минск, Беларусь

Бортновский Владимир Николаевич – кандидат медицинских наук, доцент, заведующий кафедрой общей гигиены, экологии и радиационной медицины Гомельского государственного медицинского университета, Гомель, Беларусь

Тагай Светлана Алексеевна – научный сотрудник Института радиобиологии Национальной академии наук Беларуси. Адрес для переписки: 246000, Беларусь, Гомель, ул. Федюнинского, д. 16; E-mail: lanabuz@tut.by

Дударева Наталья Владимировна – научный сотрудник Института радиобиологии Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь

Никитин Александр Николаевич – кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией радиоэкологии Института радиобиологии Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь.

Для цитирования: Нилова Е.К., Бортновский В.Н., Тагай С.А., Дударева Н.В., Никитин А.Н. Оценка современных уровней ^{241}Am и ^{137}Cs в почве, продуктах питания, доз внутреннего облучения жителей населенных пунктов, прилегающих к зоне отселения Чернобыльской АЭС (на примере Брагинского района Гомельской области Беларуси) // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 25-37. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-25-37

Assessment of the current levels of ^{241}Am and ^{137}Cs in soils and foodstuff, as well as of public internal exposure to ionizing radiation in populated areas adjacent to the Chernobyl NPP exclusion zone (case study: the Bragin district of the Gomel region, Belarus)

Ekaterina K. Nilova ¹, Vladimir N. Bortnovsky ²,

Svetlana A. Tagai ³, Natalia V. Dudareva ³, Alexander N. Nikitin ³

¹ Center for Nuclear and Radiation Safety of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus

² Gomel State Medical University, Gomel, Belarus

³ Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus

This paper is part of a research cycle focusing on studying the current levels of ^{241}Am and ^{137}Cs in soils and local foodstuffs of populated areas neighboring the Chernobyl exclusion zone. Our objective was to estimate the maximum annual committed internal doses to individuals of the Bragin-area settlements from inhalation and consumption of locally produced foods. We updated the data on the levels of ^{241}Am and ^{137}Cs in soils of 28 settlements of the district. Specific activity of ^{241}Am in soils in two of the settlements were the highest of all; we took and analyzed samples of local-grown foodstuff. ^{241}Am in food samples was measured via a radiochemical method with the use of selective chromatographic resins and alpha-spectrometry measurement. A gamma-spectrometry technique was used to measure ^{241}Am in soil and ^{137}Cs in soil and food samples. The most contaminated by ^{241}Am and ^{137}Cs appeared the soils in the town of Bragin, the administrative center of the district where the respective levels were as high as 2.8 and 560 kBq/m². Among the analyzed samples, the specific activities of ^{241}Am in root and tuber crops were one-digit values, while the samples of leafy vegetables contained a few tens of mBq/kg of the same radionuclide. That said, however, ^{241}Am concentrations in food samples were lower than those of ^{137}Cs by three orders of magnitude. The results showed an apparent difference between estimated annual committed internal doses to the Bragin residents due to ^{241}Am intake and that resulting from ^{137}Cs with the respective 0.03 and 1.7 mSv/year. The maximum doses to population of the Bragin-district villages from inhalation of ^{241}Am varied from 0.006 to 0.033 mSv/year exceeding the doses from inhaled ^{137}Cs – 0.0002–0.002 mSv/year – by one order of magnitude. The major contribution to the public internal exposure today is ^{137}Cs intake through consumption of contaminated food that produced locally; its contribution is about 93–99% of the total internal dose received by the Bragin-district residents.

Key words: ^{241}Am , ^{137}Cs , deposition density, specific activity, population, foodstuff, inhalation, internal exposure.

References

1. International Atomic Energy Agency (IAEA) The International Chernobyl Project, Technical report: Assessment of radiological consequences and evaluation of protective measures: Report by an International Advisory Committee. Vienna: IAEA; 1991: 640. ISBN 92-0-129191-4.
2. Belarus and Chernobyl: 34 years later. Information and analytical materials. Department for elimination of consequences of the Chernobyl disaster of the Ministry of emergency situations of the Republic of Belarus. Minsk: IVC Minfina; 2020: 38. (In Russian).
3. Atlas of current and future effects of the Chernobyl accident on affected parts of the Russian Federation and Belarus (ACFE Russia-Belarus). Eds.: Israel YuA, Bogdevich IM. Moscow-Minsk: Foundation «Infosfera», NIA Priroda; 2009: 140. (In Russian).
4. How many settlements are located in areas of radioactive contamination as a result of the Chernobyl disaster? – Available from: <https://chernobyl.mchs.gov.by/novosti/304098/> [Accessed 31 May 2020] (In Russian).
5. UNSCEAR 2008. Effects of Ionizing Radiation. Volume II: Report to the General Assembly, Scientific Annexes C, D and E. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. New York: United Nations; 2011: 219.
6. Konoplya EF, Kudryashov VP, Mironov VP. Radiation and Chernobyl: Transuranic elements on the Belarus territory, Gomel: RNIUP «Institute Radiologii»; 2007: 128. (In Russian).
7. Nilova EK, Bortnovsky EV, Tagai SA, Dudareva NV, Zhukova LV. ^{241}Am on the territories adjacent to the Belarusian sector of the Chernobyl NPP resettlement zone: soil contamination, foodstuffs and population internal dose assessment. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2 (special issue)): 75–82. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426x-2019-12-2s-75-82.
8. Bulavik IM, Perevolotskiy AN, Dudareva NV, Tagai SA inventors; Institute of Radiology, assignee. Republic of Belarus patent BY 3793. 2007: 231–232. (In Russian).
9. Food consumption in households. National statistical Committee of the Republic of Belarus. – Available from: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/solialnaya-sfera/uroven-zhizni-naseleniya/dokhody-i-potreblenie-domashnikh-khozyaystv/operativnye-dannye/potreblenie-osnovnykh-produktov-pitaniya-v-domashnikh-khozyaystvakh>. [Accessed 28 May 2020] (In Russian).

Svetlana A. Tagai

Institute of Radiobiology

Address for correspondence: Fediunsky Str., 16, Gomel, 246000, Belarus; E-mail: lanabuz@tut.by

10. Radiation and environmental situation in the Republic of Belarus. – Available from: <http://rad.org.by/news/radiacionno-ekologicheskaya-obstanovka-v-respublike-belarus.html> [Accessed 28 May 2020] (In Russian).
11. Ramzaev VP, Barkovsky AN. Correlation between calculated and measured values of gamma dose rate in air in forests contaminated with ^{137}Cs : the remote period after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(4): 37-46. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-37-46
12. Popplewell DS, Ham GJ, Johnson TE, Stather JW, Sumner SA. The uptake of plutonium-238, 239, 240, americium-241, strontium-90 and caesium-137 into potatoes. *Science of the Total Environment*. 1984; 38: 173-181.
13. Applbi LDzh, et al. Ways of migration of artificial radionuclides in the environment. Radioecology after Chernobyl. Ed. by Warner F, Harrison RM. Moscow: «Mir»; 1999: 512. (In Russian).
14. Pavlotskaya FI, Pospelov Yul, Myasoyedov BF, Kuznetsov YuV, Legin VK. The behavior of transplutonium elements in the environment. *Radiokhimiya = Radiochemistry*. 1991;5: 112–119. (In Russian).
15. Averin VS, Podolyak AG, Tagai SA, Kukhtevich AB, Buzdalkin KN, Tsarenok AA, et al. Americium and plutonium in agroecosystems. 1986 Chernobyl disaster. Gomel: RNIUP «Institute Radiologii»; 2014: 176. (In Russian).
16. Romney EM, Wallace A, Schulz RK, et al. Plant uptake of ^{237}Np , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{241}Am , and ^{244}Cm from soils representing major food production areas of the United States. *Soil Science*. 1981;132(1): 40-59. DOI: 10.1097/00010694-198107000-00007
17. Bunzl K, Kracke W. Soil to plant transfer of $^{239+240}\text{Pu}$, ^{238}Pu , ^{241}Am , ^{137}Cs and ^{90}Sr from global fallout in flour and bran from wheat, rye, barley and oats, as obtained by field measurements. *Science of the Total Environment*. 1987;63(C): 111-124. DOI: doi.org/10.1016/0048-9697(87)90040-4.
18. International Atomic Energy Agency (IAEA) Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards: general safety requirements. Interim edition. Vienna: IAEA; 2011: 303.
19. International Atomic Energy Agency (IAEA) IAEA-TECDOC-1162. Generic procedures for assessment and response during a radiological emergency: updating IAEA-TECDOC-1162. Vienna: IAEA; 2000: 194.
20. International Atomic Energy Agency (IAEA) Safety Standards for protecting people and environment. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements. Part 3 No GSR Part 3. Vienna: IAEA; 2014: 436.
21. International Atomic Energy Agency (IAEA) Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments/Technical Reports Series. TRS-472. Vienna: IAEA; 2010: 208.
22. International Atomic Energy Agency (IAEA) Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments / IAEA-TECDOC-1616. Vienna: IAEA; 2009: 307.
23. Podolyak AG, Tagai SA, Averin VS, Buzdalkin KN, Nilova EK. Radiation doses received by the workers involved in agricultural operations on the territories contaminated by radionuclides (^{137}Cs , ^{241}Am and $^{238,239+240}\text{Pu}$). *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2014;23(2): 85-93. (In Russian).
24. Podolyak A, Tagai S, Nilova E, Averin V. Assessment of committed doses received by agricultural workers in grain harvesting operations in the areas of radioactive contamination. *Radioprotection*. 2017;52(1): 37-43.

Received: June 20, 2020

Ekaterina K. Nilova – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher of Center for Nuclear and Radiation Safety of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus

Vladimir N. Bortnovsky – Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of General Hygiene, Ecology and Radiation Medicine, Gomel State Medical University, Gomel, Belarus

For correspondence: Svetlana A. Tagai – Researcher, Institute of Radiobiology of National Academy of Sciences of Belarus (Fediuninsky Str., 16, Gomel, 246000, Belarus; E-mail: lanabuz@tut.by)

Natalia V. Dudareva – Researcher, Institute of Radiobiology of National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus

Alexander N. Nikitin – Candidate of Agricultural Sciences, Head of the Laboratory of Radioecology, Institute of Radiobiology of National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus

For citation: Nilova E.K., Bortnovsky V.N., Tagai S.A., Dudareva N.V., Nikitin A.N. Assessment of the current levels of ^{241}Am and ^{137}Cs in soils and foodstuff, as well as of public internal exposure to ionizing radiation in populated areas adjacent to the Chernobyl NPP exclusion zone (case study: the Bragin district of the Gomel region, Belarus). *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No. 3. P. 25-37. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-25-37

Оценка влияния эксплуатации реактора БН-800 на содержание радионуклидов в местных продуктах питания района Белоярской АЭС

А.В. Панов¹, А.В. Трапезников², Н.Н. Исамов¹, А.В. Коржавин², В.К. Кузнецов¹, И.В. Гешель¹

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии,
Министерства образования и науки России, Обнинск, Россия

² Институт экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук,
Екатеринбург, Россия

В работе представлен анализ многолетних данных по влиянию газоаэрозольных выбросов и жидких сбросов Белоярской АЭС и Института реакторных материалов на содержание техногенных радионуклидов в местных пищевых продуктах. Отмечено, что расстояние и направления от радиационно опасных объектов значимо не влияют на накопление ^{90}Sr и ^{137}Cs в картофеле и молоке. На примере широкого ряда продуктов питания из частного сектора 23 населенных пунктов, лесов, рек и водохранилища 30-километровой зоны влияния Белоярской АЭС показано, что эксплуатация с 2016 г. реактора БН-800 не привела к регистрируемому увеличению содержания техногенных радионуклидов в сельскохозяйственной и природной пищевой продукции. Максимальные удельные активности ^{90}Sr (0,84 Бк/кг) и ^{137}Cs (0,26 Бк/кг) в корнеплодах, картофеле, бахчевых и овощах отмечались до начала эксплуатации нового энергоблока и были в 45 и 300 раз соответственно ниже действующих нормативов СанПиН. Наиболее высокое содержание в молоке ^{90}Sr (0,41 Бк/л) было в 60 раз ниже требований СанПиН, ^{137}Cs (0,11 Бк/л) в 900 раз меньше нормативов. В мясе домашней птицы удельная активность ^{90}Sr (0,2–0,3 Бк/кг) и ^{137}Cs (0,13–0,16 Бк/кг) в последние годы остается стабильно низкой, а нормируемое содержание ^{137}Cs в говядине (максимально – 0,12 Бк/кг) более чем в 1,5 тыс. раз ниже требований СанПиН. Наиболее высокая концентрация ^{137}Cs в лесных ягодах, обнаруженная в землянике (1,27 Бк/кг), меньше нормативов СанПиН в 125 раз. Содержание ^{90}Sr в грибах находится на уровне 0,1–2,5 Бк/кг, ^{137}Cs несколько выше – 0,6–5,8 Бк/кг. Максимально зафиксированная удельная активность ^{137}Cs в грибах ниже требований СанПиН более чем в 80 раз. Отмечено уменьшение за период наблюдений до 20% и более содержания техногенных радионуклидов в пробах 5 видов рыб; максимальные уровни ^{90}Sr и ^{137}Cs в ней были ниже наиболее жестких нормативов СанПиН (использование рыбы для детского питания) в 14 раз. Выборочный радиационный контроль пищевых продуктов района Белоярской АЭС на ^3H и ^{14}C показал, что содержание этих радионуклидов в продуктах питания находится на низком, близком к фоновому уровне. В сельскохозяйственной продукции ^3H и ^{14}C в большей степени накапливаются в картофеле и молоке, из природных продуктов в подберезовике и леще. Отмечена необходимость продолжения исследований по изучению накопления ^3H и ^{14}C в продуктах питания района Белоярской АЭС.

Ключевые слова: радиационная безопасность, радиационный мониторинг, ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^3H , ^{14}C , сельскохозяйственная пищевая продукция, природная пищевая продукция, радиационно-гигиеническая оценка, многолетняя динамика.

Введение

В районах размещения атомных электростанций оценка и прогноз дозовых нагрузок на население являются неотъемлемой частью комплекса мер по обеспече-

нию радиационной безопасности¹. При штатном режиме работы радиационное воздействие АЭС на человека определяется газоаэрозольными выбросами и жидкими сбросами, содержащими радиоактивные вещества в раз-

¹ МР 2.6.1.0063-12 Контроль доз облучения населения, проживающего в зоне наблюдения радиационного объекта, в условиях его нормальной эксплуатации и радиационной аварии: методические рекомендации. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2013. 55 с. [Methodical recommendations 2.6.1.0063-12 Monitoring of radiation doses of the population living in the observation zone of a radiation facility, in the conditions of its normal operation and radiation accident. Moscow: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rosпотребнадзор. 2013:55. (In Russ.)]

Панов Алексей Валерьевич

Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии

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

решенных количествах. Выбрасываемый из вентиляционной трубы атомной станции воздух с радиоактивными газами и аэрозолями образует факел, который распространяется над земной поверхностью, увеличиваясь в размерах и рассеиваясь. При этом радионуклиды, находящиеся в факеле, оседают на территории вокруг АЭС, поглощаются почвами и водой, накапливаются в сельскохозяйственной и природной пищевой продукции, тем самым воздействуя на человека. Жидкие сбросы атомной станции влияют на загрязнение радионуклидами рыбы, являющейся частью рациона питания населения [1–2]. Проблема радиационного контроля местных продуктов питания в районе АЭС становится особенно актуальной при увеличении мощности атомной станции, строительстве и вводе в эксплуатацию новых энергоблоков.

В настоящее время на российских АЭС используются несколько типов реакторов (РБМК, ВВЭР, БН, ЭГП) разной мощности. В выполненных ранее исследованиях на примере Ростовской АЭС (реакторы ВВЭР) и Курской АЭС (реакторы РБМК) дана комплексная радиоэкологическая оценка влияния многолетних нормализованных выбросов атомных электростанций на агроэкосистемы и накопление радионуклидов в местных пищевых продуктах [3, 4]. Настоящая работа посвящена анализу влияния работы Белоярской АЭС с реакторами на быстрых нейтронах (БН) на загрязнение сельскохозяйственных и природных пищевых продуктов техногенными радионуклидами.

Как и любая атомная станция, Белоярская АЭС (БАЭС) является потенциальным источником загрязнения окружающей среды и облучения населения. Поступление радиоактивных веществ от БАЭС во внешнюю среду происходит воздушным (через вентиляционные трубы, в виде принудительного выхлопа пара из барбаторов) и водным (за счет сбросов технологических вод в Белоярское водохранилище и Ольховское болото) путями. Радиоэкологические исследования в районе БАЭС проводятся много лет, и в большей степени они посвящены изучению влияния работы атомной станции на наземные и водные экосистемы [5–7]. Результаты этих исследований показывают, что радиоэкологическая обстановка в районе БАЭС определяется в настоящее время комплексом факторов, включая: выбросы и сбросы эксплуатирующихся реакторов БН-600 и БН-800 атомной станции, а также расположенного рядом с АЭС Института реакторных материалов (ИРМ) с действующим реактором ИВВ-2М; глобальный радиационный фон; выбросы предприятий ФГУП «ПО «Маяк»; радиоактивное загрязнение ВУРСа; чернобыльские выпадения; локальные загрязнения радионуклидами в санитарно-защитной зоне (Ольховская болотно-речная система) и зоне наблюдения БАЭС, образовавшиеся на ранних этапах работы атомной станции во время эксплуатации реакторов АМБ-100 и АМБ-200. Поскольку радионуклидный состав выбросов ИРМ схож с таковыми БАЭС, при оценке воздействия на окружающую среду и человека, обусловленного радиоактивными выпадениями, данные радиационно-опасные объекты рассматриваются вместе.

Все выделенные источники радиоактивного загрязнения в той или иной мере влияют на накопление радионуклидов в местных пищевых продуктах, потребляемых населением в регионе БАЭС. Необходимо отметить, что радиационный контроль в районе размещения атомной

станции обычно проводится для основного набора местных продуктов питания (пшеница, овощи, корнеплоды, молоко, ягоды, грибы, рыба) по суммарной бета-активности и содержанию в них ^{137}Cs [8–10]. При этом в пищевых продуктах не оцениваются такие радиологически значимые радионуклиды, как ^{90}Sr , а также органически связанные ^3H и ^{14}C , присутствующие в выбросах и сбросах БАЭС и ИРМ [11–13]. Для природных продуктов питания (грибы, ягоды, рыба) не анализируются их видовые особенности, в определенной степени влияющие на накопление радионуклидов, места их произрастания (обитания) [14–15]. Это может в итоге привести к недооценке доз внутреннего облучения населения, проживающего в районе БАЭС. Особенно важно провести анализ динамики содержания техногенных радионуклидов для более широкого набора продуктов питания после начала промышленной эксплуатации в 2016 г. на БАЭС нового реактора БН-800.

Цель исследования – оценка влияния работы реактора БН-800 на содержание радионуклидов в местных продуктах питания населения в районе размещения Белоярской АЭС и Института реакторных материалов.

Задачи исследования

1. Оценка вклада газоаэрозольных выбросов БАЭС и ИРМ в накопление техногенных радионуклидов в картофе и молоке местного производства на различном расстоянии от радиационно-опасных объектов.
2. Анализ динамики содержания радионуклидов в сельскохозяйственных и природных продуктах питания населения в зоне влияния Белоярской АЭС до и после начала эксплуатации реактора БН-800.
3. Сравнительная оценка удельной активности техногенных радионуклидов в сельскохозяйственных и природных пищевых продуктах района размещения Белоярской АЭС на соответствие радиологическим требованиям СанПиН.
4. Обобщение результатов многолетних наблюдений (2002–2019 гг.) за содержанием радионуклидов в местных продуктах питания района БАЭС.

Материалы и методы

Мониторинг содержания радионуклидов в пищевых продуктах для обеспечения эффективного контроля за радиационной обстановкой должен быть оптимизирован до минимального объема, обеспечивающего достоверной и объективной информацией о территории с учетом особенностей региона исследования, например, наличия радиационно-опасных объектов I категории, локальных радиоактивных загрязнений, прошлых аварий и т.д. [16]. В рамках радиоэкологических исследований такой мониторинг может быть расширен как территориально, так и по набору продуктов питания, а также радионуклидному составу с целью установления наиболее «критичных» источников и значимых путей поступления радионуклидов в организм человека, определения основных дозообразующих радиоизотопов.

Площадка БАЭС расположена в 42 км от г. Екатеринбурга и в 3,5 км от г. Заречный на берегу водоема-охладителя – Белоярского водохранилища, образованного на реке Пышма. Радиус санитарно-защитной зоны (СЗЗ) атомной станции составляет 3–5 км в границах промпло-

щадки АЭС, включая территорию Ольховского болота (5 км от станции) и трубопровод хозфекального коллектора. Зона наблюдения (ЗН) АЭС ограничена радиусом 13 км от реактора БН-600 [8–10]. Наиболее крупными населенными пунктами, входящими в 30-километровую зону влияния атомной станции, являются г. Заречный (население 30 тыс. чел.) и г. Асбест (население 63 тыс. чел.). С меньшим числом жителей (5–10 тыс. чел.) можно выделить три поселка городского типа: Малышева, Белоярский и Верхнее Дуброво. Остальные населенные пункты являются сельскими с населением менее 5 тыс. человек.

Для оценки степени воздействия выбросов БАЭС и ИРМ на загрязнение радионуклидами местных пищевых продуктов и влияния на этот процесс эксплуатации

нового реактора БН-800 населенные пункты, входящие в 30-километровую зону вокруг атомной станции, и те, где ведется сельское хозяйство в частном секторе, были условно разделены на три зоны: ближняя (радиус не более 5 км от БАЭС), зона наблюдения (5–15 км от станции) и зона влияния (15–30 км от БАЭС). В ближнюю зону вошли 2 населенных пункта, в зону наблюдения – 9 и в зону влияния – 12 поселений (табл. 1). Населенные пункты, включенные в сеть мониторинга, выбирались с учетом розы ветров в регионе исследования, на разном расстоянии и направлениях от энергоблока БН-800.

Мониторинговые исследования проведены в одно время (август) в 2013 г. до физического пуска энергоблока БН-800 и в 2019 г., через три года после начала

Таблица 1

Населенные пункты сети радиационного мониторинга продуктов питания в районе Белоярской АЭС

[Table 1]

Settlements of the foodstuff radiation monitoring network in the vicinity of Beloyarsk NPP

Ближняя зона АЭС [Nearest zone of NPP]		Зона наблюдения АЭС [Observation zone of NPP]		Зона влияния АЭС [Influence zone of NPP]	
Населенный пункт [Settlement]	Направление и расстояние от АЭС, км [Direction and distance from NPP, km]	Населенный пункт [Settlement]	Направление и расстояние от АЭС, км [Direction and distance from NPP, km]	Населенный пункт [Settlement]	Направление и расстояние от АЭС, км [Direction and distance from NPP, km]
Заречный [Zarechny]	Ю, 3,5 [S, 3,5]	Шеелит [Sheelite]	Ю, 8 [S, 8]	Малобрусянское [Malobrusyanskoje]	Ю-З, 17 [S-W, 17]
Режик [Rezhik]	В, 4,5 [E, 4,5]	Муранитный [Muranitny]	Ю-В, 8,5 [S-E, 8,5]	Асбест [Asbest]	С-В, 19 [N-E, 19]
–	–	Ялунина [Yalunina]	Ю-В, 9,5 [S-E, 9,5]	Становая [Stanovaya]	С-З, 20 [N-W, 20]
–	–	Гарка [Gagarka]	Ю-З, 10 [S-W, 10]	Верхнее Дуброво [Verhnee Dubrovo]	Ю-З, 20 [S-W, 20]
–	–	Малиновка [Malinovka]	В, 11,5 [E, 11,5]	Рассоха [Rassoha]	Ю-З, 23 [S-W, 23]
–	–	Мезенское [Mezenskoe]	Ю, 12 [S, 12]	Бобровка [Bobrovka]	Ю-З, 24 [S-W, 24]
–	–	Белоярский [Beloyarsky]	Ю-В, 12,5 [S-E, 12,5]	Измодедова [Izmodenova]	Ю-В, 24 [S-E, 24]
–	–	Баженово [Bazhenovo]	Ю, 14,5 [S, 14,5]	Изумруд [Izumrud]	С-В, 24 [N-E, 24]
–	–	Сапулка [Sapulka]	З, 15 [W, 15]	Большебрусянское [Bolshebrusyanskoje]	Ю-З, 24,5 [S-W, 24,5]
–	–	–	–	Косулино [Kosulino]	Ю-З, 25 [S-W, 25]
–	–	–	–	Грязновское [Gryaznovskoye]	Ю-В, 25,5 [S-E, 25,5]
–	–	–	–	Кочнево [Kochnevo]	Ю-В, 27 [S-E, 27]
–	–	–	–	Исток [Istok]	Ю-З, 27,5 [S-W, 27,5]
–	–	–	–	Орлова [Orlova]	Ю-В, 27,8 [S-E, 27,8]
–	–	–	–	Малышева [Malysheva]	С-В, 28 [N-E, 28]
–	–	–	–	Бараба [Baraba]	Ю-В, 29,5 [S-E, 29,5]

его промышленной эксплуатации. Это дало возможность оценить влияние работы нового реактора на динамику содержания радионуклидов в местных продуктах питания района БАЭС. На частных подворьях, рынках и в садовых участках населенных пунктов сети мониторинга отбирались пробы сельскохозяйственных продуктов питания местного производства (табл. 2).

В 2013 г. отобрано 40 проб бахчевых, овощей и корнеплодов, в 2019 г. – 21 проба продукции растениеводства. Фруктов и садовых ягод в 2013 г. отобрано 6 проб, в 2019 г. – 2 пробы. Продукция животноводства и птицеводства в ближней зоне БАЭС не производится, поэтому пробы данного вида отбирались в населенных пунктах зон наблюдения и влияния БАЭС в радиусе 5–30 км от станции. В 2013 г. отобрано 12 проб, в 2019 г. – 9 проб молока, мяса и домашней птицы.

Пробы природной продукции наземных экосистем (грибы, лесные ягоды) отбирались в лесах, занимающих 85% территории вокруг БАЭС, в окрестностях населенных пунктов сети мониторинга (табл. 3). Грибов разных видов отобрано в 2013 г. – 4 пробы, в 2019 г. – 3 пробы, лесных ягод в 2013 г. и 2019 г. – по 4 пробы. Рыбу вылавливали из Белоярского водохранилища, а также 6 рек, входящих в 30-километровую зону влияния БАЭС. В 2013 г. отобрано 38 проб рыбы, в 2019 г. – 19 проб разных видов. Из-за большой протяженности Белоярского водохранилища (длина около 20 км, ширина рядом с БАЭС – 3 км) участки водоема, где проводился отлов рыбы, расположены на разном расстоянии от атомной станции. Поэтому, с учетом миграции рыбы, идентифицировать степень влияния БАЭС и ИРМ на содержание в ней радионуклидов можно с достаточной степенью приближения.

Таблица 2

Объем мониторинговых исследований сельскохозяйственных продуктов питания местного производства в районе размещения Белоярской АЭС, число проб

[Table 2]

The scope of monitoring investigations of locally produced agricultural foodstuff in the vicinity of Beloyarsk NPP, number of samples]

Продукт питания [Foodstuff]	Ближняя зона АЭС [Nearest zone of NPP]		Зона наблюдения АЭС [Observation zone of NPP]		Зона влияния АЭС [Influence zone of NPP]	
	2013 г. [2013 y.]	2019 г. [2019 y.]	2013 г. [2013 y.]	2019 г. [2019 y.]	2013 г. [2013 y.]	2019 г. [2019 y.]
Овощи [Vegetable]						
Кабачки [Zucchini]	–	–	3	–	4	5
Капуста [Cabbage]	3	1	1	–	–	–
Картофель [Potato]	2	1	7	3	1	2
Лук [Onion]	–	–	1	–	–	–
Морковь [Carrot]	1	1	1	–	4	2
Огурцы [Cucumber]	1	1	–	–	4	1
Свекла [Beetroot]	1	1	2	–	–	–
Томаты [Tomato]	1	1	1	–	–	1
Тыква [Pumpkin]	–	–	1	1	1	–
Фрукты и ягоды [Fruit and berry]						
Вишня [Cherry]	–	–	1	–	–	–
Крыжовник [Gooseberry]	–	–	–	–	–	1
Смородина [Currant]	–	–	1	–	2	1
Яблоки [Apple]	1	–	1	–	–	–
Продукция животноводства и птицеводства [Animal product and poultry]						
Молоко [Milk]	–	–	6	4	4	3
Говядина [Beef]	–	–	–	–	–	1
Свинина [Pork]	–	–	–	–	1	–
Мясо кур [Chicken meat]	–	–	1	1	–	–
МАЭД, мкЗв/ч [Ambient dose equivalent rate, $\mu\text{Sv/h}$]	0,11±0,01	0,09±0,03	0,10±0,02	0,08±0,02	0,10±0,02	0,11±0,01

Объем мониторинговых исследований природных продуктов питания в районе размещения Белоярской АЭС

Таблица 3

[Table 3]

The scope of monitoring investigations of natural foodstuffs in the vicinity of Beloyarsk NPP, number of samples

Продукт питания [Foodstuff]	Год отбора проб [Sampling year]	Число проб [Number of samples]	Место отбора проб [Sampling location]
Грибы [Mushroom]			
Маслята [Yellow boletus]	2013	1	Лес рядом с Верхнее Дуброво [Forest near Verhnee Dubrovo]
Подосиновик [Orange-cap boletus]	2013	1	Лес рядом с Муранитный [Forest near Muranitny]
Подберезовик [Rough boletus]	2013	1	Ольховское болото [Olkhov swamp]
Белый [Cep]	2013	1	Лес рядом с Измоденова [Forest near Izmodenova]
Маслята [Yellow boletus]	2019	3	Леса рядом с Заречный, Верхнее Дуброво, Орлово [Forests near Zarechny, Verhnee Dubrovo, Orlovo]
Ягоды [Berry]			
Малина [Raspberry]	2013	2	Леса рядом с Малобрусянское, Измоденова [Forests near Malobrusyanskoe, Izmodenova]
Черника [Blueberry]	2013	1	Лес рядом с Баженово [Bazhenovo]
Земляника [Strawberry]	2013	1	Лес рядом с Измоденова [Forest near Izmodenova]
Черника [Blueberry]	2019	3	Леса рядом с Режик, Ялунина, Косулино [Forests near Rezhik, Yalunina, Kosulino]
Малина [Raspberry]	2019	1	Лес рядом с Заречный [Forest near Zarechny]
Рыба [Fish]			
Карп [Carp]	2013	2	Белоярское водохранилище, реки: Режик, Ольховка, Каменка, Мезенка, Камышенка, Гагарка [Beloyarsk reservoir, rivers: Regik, Olkhovka, Kamenka, Mezenka, Kamyshenka, Gagarka]
Плотва [Roach]	2013	17	
Судак [Pikeperch]	2013	1	
Лещ [Bream]	2013	4	
Окунь [Perch]	2013	8	
Щука [Pike]	2013	6	
Плотва [Roach]	2019	6	
Судак [Pikeperch]	2019	1	
Лещ [Bream]	2019	4	
Окунь [Perch]	2019	6	
Щука [Pike]	2019	2	

Пробоподготовку и измерения проб пищевой продукции проводили в лаборатории радиационного контроля ФГБНУ ВНИИРАЭ (аттестат аккредитации RA.RU.21AД81). Для анализа содержания радионуклидов (^{40}K , ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^3H , ^{14}C) в продуктах питания использовали высокочувствительные радиометрические и спектрометрические комплексы. Гамма-излучающие радионуклиды определяли на спектрометре ГАММА-1П с двумя измерительными трактами с полупроводниковыми детекторами из особо чистого германия («ЛСРМ», Россия, «EG&G ORTEC», США) и многоканальном гамма-спектрометре CANBERRA («Canberra Industries, Inc.», США). ^{90}Sr из проб выделяли радиохимическим способом. Альфа- и бета-активность препаратов измеряли на жидкосцинтилляционном спектрометре TRI-CARB 4810 TR («Perkin Elmer», США), жид-

косцинтилляционном спектрометрическом комплексе СКС-07П-Б11 («Green Star», Россия) и альфа-бета-радиометре с кремниевым детектором УМФ-2000 (НПП «Доза», Россия). Относительная погрешность измерений активности радионуклидов составляла 6–30% в зависимости от используемого прибора и метода измерения. Оценка содержания в некоторых пробах сельскохозяйственной и природной пищевой продукции ^3H и ^{14}C проведена в сотрудничестве со специалистами АО «Радиовый институт имени В.Г. Хлопина» Госкорпорации «Росатом».

Результаты и обсуждение

При отборе проб пищевых продуктов в населенных пунктах измеряли мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД). Отмечено, что как до пуска энергоблока БН-

800, так и после начала его промышленной эксплуатации МАЭД в населенных пунктах 30-километровой зоны влияния БАЭС и ИРМ оставалась на уровне фоновых значений и варьировала в пределах 0,09–0,11 мкЗв/ч (см. табл. 2).

На первом этапе анализа результатов исследования оценены степень влияния БАЭС и ИРМ по расстоянию от этих радиационно-опасных объектов на загрязнение радиологически значимыми ^{90}Sr и ^{137}Cs основных сельскохозяйственных продуктов питания, использующихся для оценки доз внутреннего облучения населения: картофеля (рис. 1) и молока (рис. 2).

Видно, что по мере удаления от БАЭС и ИРМ удельная активность техногенных радионуклидов в картофеле не только не снижается, но даже несколько возрастает, что говорит об отсутствии значимого влияния газоаэрозольных выбросов радиационно-опасных объектов на загрязнение продукции растениеводства. Такая закономерность прослеживается как до, так и после начала эксплуатации реактора БН-800 на БАЭС. Стоит отметить,

что вариации содержания в картофеле радионуклидов на разном расстоянии от БАЭС и ИРМ незначительны и составляют 0,5–0,8% от норматива СанПиН 2.3.2.2650-10² по ^{90}Sr и 0,05–0,1% по ^{137}Cs .

В молоке при удалении от БАЭС и ИРМ содержание техногенных радионуклидов несколько снижается. До пуска БН-800 это было более выражено для ^{137}Cs , а после начала эксплуатации нового реактора – для ^{90}Sr . Однако и эти изменения оказались минимальны. Уровни концентрации радионуклидов в молоке двух рассматриваемых зон варьировали в пределах 0,7–2% от допустимого уровня СанПиН 2.3.2.1078-01³ по ^{90}Sr и 0,03–0,2% по ^{137}Cs . Поскольку диапазон данных активности радионуклидов в продуктах питания по выделенным зонам укладывался в ошибку измерений и значимо между собой не отличался, при дальнейшем анализе влияния эксплуатации реактора БН-800 результаты радиационного контроля за каждый год рассматривались вместе, без выделения зон влияния БАЭС.

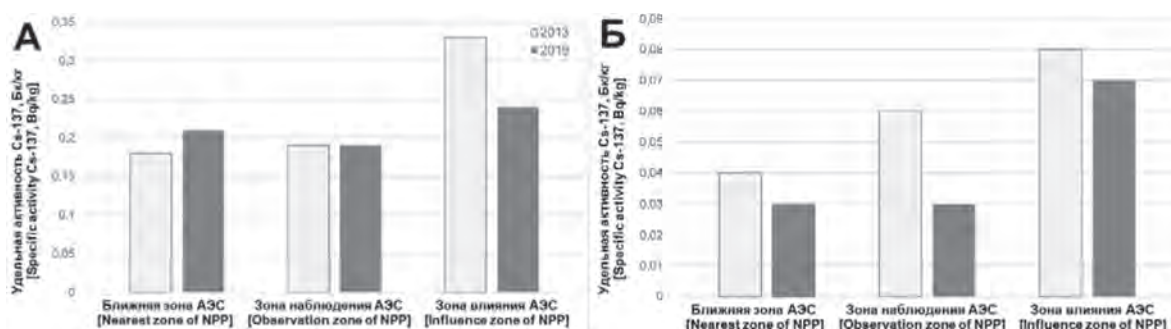


Рис. 1. Содержание техногенных радионуклидов (А – ^{90}Sr , Б – ^{137}Cs) в картофеле, произведенном на разном расстоянии от Белоярской АЭС в 2013 и 2019 гг., Бк/кг

[Fig. 1. Content of artificial radionuclides (A – ^{90}Sr , B – ^{137}Cs) in potato produced in different distance from Beloyarsk NPP in 2013 and 2019, Bq/kg]

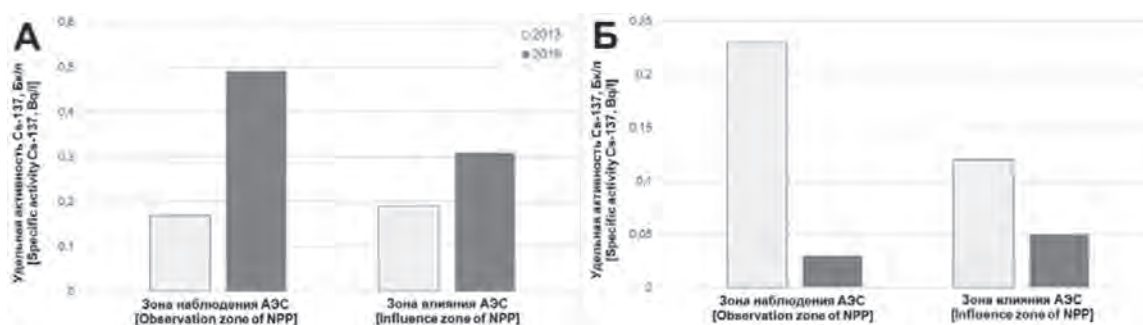


Рис. 2. Содержание техногенных радионуклидов (А – ^{90}Sr , Б – ^{137}Cs) в молоке, произведенном на разном расстоянии от Белоярской АЭС в 2013 и 2019 гг., Бк/л

[Fig. 2. Content of artificial radionuclides (A – ^{90}Sr , B – ^{137}Cs) in milk produced in different distance from Beloyarsk NPP in 2013 and 2019, Bq/l]

² СанПиН 2.3.2.2650-10 Дополнения и изменения № 18 к СанПиН 2.3.2.1078-01 «Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов». М.: Минздрав РФ, 2010. 13 с. [Sanitary Rules and Norms 2.3.2.2650-10 Additions and changes № 18 to Sanitary Rules and Norms 2.3.2.1078-01 "Hygienic requirements for food safety and nutritional value". Moscow: Ministry of Health of the Russian Federation. 2010:13. (In Russ.)]

³ СанПиН 2.3.2.1078-01 Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов // Бюллетень нормативных и методических документов госсанэпиднадзора. 2002. №4(10). С. 9–144. [Sanitary Rules and Norms 2.3.2.1078-01 Hygienic requirements for food safety and nutritional value. Bulletin of regulations and methodological documents of the state sanitary and epidemiological supervision. 2002;4(10): 9-144. (In Russ.)]

За весь период наблюдений (2013 и 2019 гг.) содержание природного ^{40}K в картофеле, овощах и корнеплодах варьировало в пределах 48–157 Бк/кг, во фруктах и садовых ягодах на уровне 58–168 Бк/кг, в продукции животноводства в диапазоне 18–97 Бк/кг, что является средним региональным показателем для сельскохозяйственной пищевой продукции (табл. 4).

Удельная активность техногенных радионуклидов в бахчевых, картофеле, овощах и корнеплодах была низкой как до, так и после начала эксплуатации

БН-800. Работа нового энергоблока БАЭС не привела к увеличению содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в данных видах пищевой продукции, а в некоторых из них (например, в свекле и тыкве) отмечено снижение концентрации обоих радионуклидов. Из всех продуктов растениеводства даже максимальные уровни содержания ^{90}Sr (0,84 Бк/кг) и ^{137}Cs (0,26 Бк/кг), отмеченные в свекле в 2013 г., были в 45 и 300 раз соответственно ниже действующих нормативов (СанПиН 2.3.2.1078-01⁴ и СанПиН 2.3.2.2650-10⁵).

Таблица 4

**Содержание радионуклидов в сельскохозяйственных пищевых продуктах, произведенных в районе
Белоярской АЭС в 2013 и 2019 гг., Бк/кг(л)**

[Table 4]

Content of radionuclides in agricultural foodstuff produced in the vicinity of Beloyarsk NPP in 2013 and 2019, Bq/kg(l)

Продукт питания [Foodstuff]	⁴⁰ K	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	Допустимые уровни [Permissible levels]	
				⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs
Овощи [Vegetables]					
Кабачки [Zucchini]	56±9*	0,15±0,07	0,05±0,04	40	80
	78±14**	0,05±0,02	0,04±0,03		
Капуста [Cabbage]	56±11	0,4±0,03	0,04±0,03		
	72±6	0,6±0,02	0,012±0,006		
Картофель [Potato]	139±58	0,22±0,14	0,06±0,03		
	157±60	0,21±0,09	0,05±0,04		
Лук [Onion]	52±21*	0,46±0,04*	0,08±0,06*		
Морковь [Carrot]	129±18	0,16±0,01	0,05±0,02		
	125±81	0,23±0,15	0,06±0,01		
Огурцы [Cucumber]	48±12	0,04±0,02	0,076±0,064		
	72±2	0,03±0,01	0,01±0,001		
Свекла [Beetroot]	128±28	0,84±0,08	0,26±0,22		
	96±10	0,1±0,03	0,07±0,02		
Томаты [Tomato]	113±27	0,08±0,06	0,13±0,05		
	70±1	0,18±0,03	0,05±0,03		
Тыква [Pumpkin]	91±1	0,17±0,02	0,03±0,01		
	62±5	0,08±0,02	0,01±0,006		
Фрукты и ягоды [Fruit and berry]					
Крыжовник [Gooseberry]	58±5**	0,35±0,09**	0,03±0,02**	—	—
Смородина [Currant]	89±10	0,49±0,05	0,48±0,05		
	69±6	0,19±0,06	0,013±0,006		
Яблоки [Apple]	168±80*	1,9±0,03*	0,57±0,35*		
Продукция животноводства и птицеводства [Animal product and poultry]					
Молоко [Milk]	57±14	0,18±0,14	0,11±0,09	25	100
	39±4	0,41±0,21	0,04±0,02		
Говядина [Beef]	35±3**	2,4±0,1**	0,12±0,03**		200
Свинина [Pork]	97±10*	0,18±0,1*	0,26±0,2*	—	-
Мясо кур [Chicken meat]	56±3	0,29±0,02	0,13±0,1		
	18±2	0,2±0,1	0,16±0,1		

* – 2013 г., ** – 2019 г.

⁴ СанПиН 2.3.2.1078-01. 2002. С. 44 [Sanitary Rules and Norms 2.3.2.1078-01. 2002. P. 44. (In Russ.)]

⁵ СанПиН 2.3.2.2650-10. 2010. С. 4 [Sanitary Rules and Norms 2.3.2.2650-10. 2010. P. 4. (In Russ.)]

Концентрация ^{90}Sr во фруктах и садовых ягодах в районе БАЭС и ИРМ находится в пределах 0,19–1,9 Бк/кг, ^{137}Cs – 0,013–0,57 Бк/кг. На примере данных по смородине видно, что после начала эксплуатации реактора БН-800 содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в этих ягодах снизилось в 2,5 и более раз.

Как было отмечено выше, после начала работы реактора БН-800 динамика объемной активности техногенных радионуклидов в молоке, производящемся в зоне влияния БАЭС и ИРМ, была разнонаправленной: по ^{90}Sr она немного возросла, по ^{137}Cs снизилась. В то же время сравнение максимальных значений по содержанию ^{90}Sr (0,41 Бк/л) и ^{137}Cs в молоке (0,11 Бк/л) с требованиями СанПиН⁶ показывает, что они в 60 раз по стронцию и в 900 раз по цезию ниже граничных уровней, установленных действующими нормативами. Эксплуатация нового реактора не привела к значимому увеличению содержания техногенных радионуклидов и в мясной продукции, а также птице. В мясе кур удельная активность ^{90}Sr и ^{137}Cs в последние годы остается

стабильно низкой, а нормируемое содержание ^{137}Cs в говядине, по данным обследования 2019 г., оказалось более чем в 1,5 тыс. раз ниже требований СанПиН⁷ (см. табл. 4). Стоит отметить, что, в отличие от других российских АЭС [3–4], в данном регионе в продукции животноводства в большей степени накапливается ^{90}Sr , а не ^{137}Cs . Это обусловлено аварийными выпадениями 1957 г., образующими Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС). В целом, можно заключить, что содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в сельскохозяйственной продукции, производящейся в зоне влияния БАЭС и ИРМ, в последние годы находится на очень низком уровне, начало эксплуатации реактора БН-800 не привело к регистрируемому увеличению содержания в ней техногенных радионуклидов.

Радиационный контроль природных компонентов рациона питания населения в районе БАЭС и ИРМ показывает, что содержание ^{40}K в лесных ягодах находится на уровне 30–300 Бк/кг, что шире аналогичного диапазона для садовых ягод (табл. 5). На эти отличия влияют

Таблица 5
Содержание радионуклидов в природных пищевых продуктах района Белоярской АЭС в 2013 и 2019 гг., Бк/кг

Content of radionuclides in natural foodstuff in the vicinity of Beloyarsk NPP in 2013 and 2019, Bq/kg

Продукт питания [Foodstuff]	⁴⁰ K	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	Допустимые уровни [Permissible levels]	
				⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs
Ягоды [Berry]					
Земляника [Strawberry]	89±13*	1,14±0,1*	1,27±0,6*	–	160
Малина [Raspberry]	<u>90±16*</u>	<u>0,47±0,05</u>	<u>0,18±0,01</u>		
	102±25**	0,3±0,07	0,02±0,01		
Черника [Blueberry]	<u>300±100</u>	<u>1,2±0,2</u>	<u>0,9±0,7</u>		
	30±2	0,18±0,02	0,2±0,09		
Грибы [Mushroom]					
Маслята [Yellow boletus]	<u>76±8</u>	<u>0,10±0,01</u>	<u>1,7±0,4</u>	–	500
	64±5	0,06±0,03	3,7±1,5		
Подосиновик [Orange-cap boletus]	110±20*	0,08±0,01*	0,6±0,1*		
Подберезовик [Rough boletus]	115±34*	0,07±0,01*	5,8±1,5*		
Белый [Cep]	79±29*	2,4±0,2*	2,2±1,1*		
Рыба [Fish]					
Карп [Carp]	105±22*	1,5±1,2*	7,1±3,3*	100 (для детского питания 60)	130 (для детского питания 100)
Плотва [Dace]	<u>94±17</u>	<u>2,9±2,4</u>	<u>3,1±2,5</u>		
	21±2	2,3±1,4	1,8±1,2		
Судак [Pikeperch]	93±19*	0,1±0,01*	3,9±0,3		
			2,1±0,6		
Лещ [Bream]	90±14*	<u>4,36±0,25</u>	<u>1,99±0,47</u>		
		4,0±0,4	1,4±0,6		
Окунь [Perch]	85±22*	<u>1,95±1,2</u>	<u>4,4±1,3</u>		
		1,95±0,2	3,5±0,9		
Щука [Pike]	91±19*	2,9±1,5*	<u>1,5±0,6</u>		
			0,7±0,1		

* – 2013 г., ** – 2019 г.

⁶ СанПиН 2.3.2.1078-01. 2002. С. 24 [Sanitary Rules and Norms 2.3.2.1078-01. 2002. P. 24. (In Russ.)]

⁷ СанПиН 2.3.2.2650-10. 2010. С. 2 [Sanitary Rules and Norms 2.3.2.2650-10. 2010. P. 2. (In Russ.)]

как места произрастания ягодных культур, так и видовые особенности растений. Например, по кустарниковым (крыжовник, смородина, малина) результаты мониторинга содержания ^{40}K в ягодах лесных и садовых растениях оказались близки (60–100 Бк/кг). Содержание природного калия в грибах отмечено в пределах 64–115 Бк/кг, в рыбе – от 21 до 105 Бк/кг.

Данные радиационного контроля показывают, что после начала работы реактора БН-800 содержание техногенных радионуклидов в лесных ягодах не увеличилось. Максимальные уровни концентрации ^{137}Cs в землянике (1,27 Бк/кг), отмеченные до пуска нового энергоблока, были ниже требований СанПиН⁸ в 125 раз (см. табл. 5). Содержание ^{90}Sr в грибах в период наблюдений находилось на уровне 0,1–2,5 Бк/кг, ^{137}Cs несколько выше – 0,6–5,8 Бк/кг. На разброс данных по содержанию техногенных радионуклидов в грибах большое влияние оказывают как место их сбора (в СЗЗ и ЗН БАЭС есть участки с повышенными плотностями загрязнения), так и видовые особенности грибов, являющихся абсорбентами загрязняющих веществ [15]. Максимально зафиксированная удельная активность ^{137}Cs отмечена в пробе подберезовиков, отобранных в лесу в районе Ольховского болота, однако и она была ниже норматива СанПиН⁹ более чем в 80 раз.

В работе [2], по данным мониторинга 2005–2008 гг., до пуска реактора БН-800 содержание ^{90}Sr в грибах и ягодах отмечалось на уровне 0,07 Бк/кг. Средняя удельная активность ^{137}Cs в грибах составляла 2,9, в ягодах 0,19 Бк/кг, что близко к результатам, полученным в настоящем исследовании.

Рыба, представляющая в водных экосистемах высший трофический уровень, непосредственно связана с пищевой цепочкой человека. Большую практическую значимость в этом плане приобретают работы по ее радиационному контролю, проводимые на водоемах-охладителях, которые широко используются для рыболовства и рыбозахвата [17]. В условиях Белоярского водохранилища на подогретых водах много лет функционирует рыбное хозяйство по выращиванию садкового карпа. Кроме того, в водоеме ведется промышленный и любительский отлов рыбы. Радиэкологические исследования рыбы Белоярского водохранилища проводятся с 1980-х гг. [5, 14]. Они были направлены на оценку роли температурного фактора при накоплении радионуклидов ихтиофауной, радиационной чистоты рыбной продукции, выращиваемой в условиях садкового хозяйства на подогретых водах, и уровней накопления радионуклидов различными видами свободноживущей рыбы Белоярского водохранилища. Проведена сравнительная оценка концентраций ^{60}Co и ^{137}Cs в плотве двух зон водоема-охладителя – Теплому заливу и верховью. Как показали полученные результаты, в зоне подогрева водохранилища сбросными водами БАЭС (Теплый залив) концентрация обоих радионуклидов в рыбе во все периоды наблюдений была в среднем выше, чем в верховье. Аналогичные данные получены по содержанию ^{137}Cs в щуке и леще. Оба вида рыб, отловленных в зоне подогрева, содержали примерно в 2 раза боль-

ше радионуклида, чем в контрольном районе [14]. В результате многолетних исследований также показано, что концентрация ^{137}Cs в садковом карпе, выращиваемом на теплых водах Белоярского водохранилища с использованием искусственного корма, несколько ниже, чем в плотве. С одной стороны, это обусловлено видовыми особенностями рыб (при прочих равных условиях свободноживущий карп накапливает ^{137}Cs меньше, чем плотва), а с другой – способом их питания. Садковый карп питается искусственным кормом с фоновым содержанием радионуклидов, а плотва, свободно обитающая в водоеме, использует корм, обогащенный техногенными радионуклидами. Таким образом, основным путем поступления ^{137}Cs в организм рыб является пищевой канал.

По данным мониторинга 2013 и 2019 гг., за 6 лет во всех выловленных образцах рыб произошло снижение содержания техногенных радионуклидов, которое составило по ^{90}Sr – 8–20%, по ^{137}Cs – более 20% в зависимости от вида ихтиофауны (см. табл. 5). Динамика по снижению накопления техногенных радионуклидов в рыбе отмечена также в более ранних исследованиях [14] и обусловлена значительным уменьшением поступления радионуклидов в водные экосистемы после остановки на БАЭС реакторов АМБ-100 и АМБ-200. В ходе текущих исследований максимальные уровни содержания ^{90}Sr были зафиксированы в леще, но и они были ниже наиболее жестких нормативов СанПиН (использование рыбы для детского питания) в 14 раз. Максимальные уровни загрязнения ^{137}Cs зафиксированы в свободно живущем карпе до пуска реактора БН-800, и они были меньше наиболее жестких нормативов СанПиН для детского питания в 14 раз. В работе [2] содержание ^{90}Sr в рыбе оценивается на уровне 0,12 Бк/кг, ^{137}Cs – 1,3 Бк/кг, что сопоставимо с результатами данной работы.

Основываясь на многолетних данных статистики, водные экосистемы района БАЭС и ИРМ можно расположить в следующем ряду по снижению содержания ^{90}Sr в рыбе: реки ЗН БАЭС (Камышенка, Гагарка, Режик, Мезенка, Каменка) ($3,7 \pm 1,8$ Бк/кг) > Белоярское водохранилище ($2,8 \pm 0,5$ Бк/кг). По снижению содержания ^{137}Cs в рыбе ряд выглядит следующим образом: Белоярское водохранилище ($5,8 \pm 3,4$ Бк/кг) > реки ЗН БАЭС ($1,5 \pm 0,3$ Бк/кг).

В исследуемом регионе БАЭС и ИРМ важно проанализировать многолетнюю динамику накопления техногенных радионуклидов в пищевой продукции. Такая оценка выполнена для 2002, 2006, 2013 и 2019 гг. (рис. 3).

В течение последних 17 лет вариации содержания ^{90}Sr во всех рассмотренных продуктах, кроме рыбы, не превышают 0,5 Бк/кг. Концентрация радиоизотопа стронция в рыбе выше, в пределах 1,8–2,8 Бк/кг. Ни в одном из пищевых продуктов не отмечен значимый рост содержания ^{90}Sr в период 2002–2019 гг. Концентрация ^{137}Cs в корнеплодах, овощах, молоке и ягодах также менее 0,5 Бк/кг. Более высокая, по сравнению с другими продуктами, удельная активность ^{137}Cs в рыбе ($2,2$ – $3,5$ Бк/кг) и грибах ($1,4$ –

⁸ СанПиН 2.3.2.2650-10. 2010. С. 5 [Sanitary Rules and Norms 2.3.2.2650-10. 2010. P. 5. (In Russ.)]

⁹ СанПиН 2.3.2.2650-10. 2010. С. 5 [Sanitary Rules and Norms 2.3.2.2650-10. 2010. P. 5. (In Russ.)]

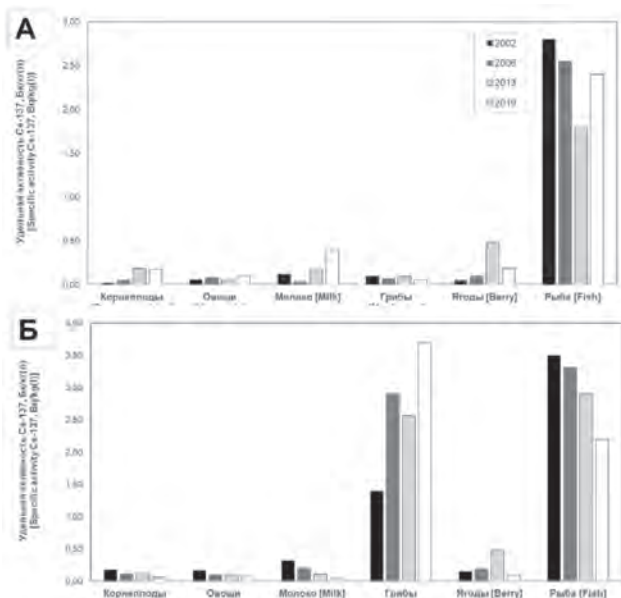


Рис. 3. Динамика содержания техногенных радионуклидов (А – ^{90}Sr , Б – ^{137}Cs) в пищевых продуктах района Белоярской АЭС, Бк/кг(л)

[Fig. 3. Dynamic of content artificial radionuclides (A – ^{90}Sr , Б – ^{137}Cs) in foodstuff in the vicinity of Beloyarsk NPP, Bq/kg(l)]

3,7 Бк/кг) объясняется особенностями их местообитания (произрастания). Учитывая низкое, относительно требований СанПиН, содержание техногенных радионуклидов

в грибах и рыбе, а также их небольшой вклад в рацион питания населения, нельзя говорить о значимом влиянии на дозоформирование населения от этих пищевых продуктов.

По данным многолетних (2002–2019 гг.) наблюдений, основные пищевые продукты в районе БАЭС по накоплению ^{90}Sr можно расположить в ряд: рыба (2,4 Бк/кг) > ягоды (0,21 Бк/кг) > молоко (0,19 Бк/л) > корнеплоды (0,11 Бк/кг) > грибы (0,08 Бк/кг) > овощи (0,07 Бк/кг). По содержанию ^{137}Cs ряд продуктов питания будет выглядеть иначе: рыба (2,9 Бк/кг) > грибы (2,6 Бк/кг) > ягоды (0,23 Бк/кг) > молоко (0,17 Бк/л) > корнеплоды (0,12 Бк/кг) > овощи (0,11 Бк/кг).

Большое значение для обеспечения радиационной безопасности в районе БАЭС и ИРМ имеет контроль в продуктах питания таких важных биофильных радионуклидов, как ^3H и ^{14}C . Тритий (^3H) – сверхтяжелый изотоп водорода, характеризуется большой подвижностью как в водной, так и воздушной среде. Данный радионуклид непрерывно образуется при делении ядер урана и плутония в технологическом цикле работы энергоблоков БН-600 и БН-800 БАЭС и присутствует в составе выбросов и сбросов атомной станции [18]. Углерод-14 (^{14}C) является одним из изотопов в линейке продукции ИРМ [19]. При работе АЭС ^3H и ^{14}C поступают в окружающую среду, включаются в состав биологической ткани, вызывая мутагенные нарушения как посредством β -излучения, так и за счет нарушения молекулярных связей (трансмутации). В 2013 г. совместно с АО «Радиовый институт» были выполнены оценки накопления органически связанных ^3H и ^{14}C в отдельных видах пищевой продукции района размещения БАЭС и ИРМ (табл. 6).

Содержание органически связанных ^3H и ^{14}C в пищевых продуктах района Белоярской АЭС в 2013 г., Бк/кг

Таблица 6

[Table 6]

Content of organically bound ^3H and ^{14}C in foodstuff in the vicinity of Beloyarsk NPP in 2013, Bq/kg

Продукт питания [Foodstuff]	Число проб [Number of samples]	^3H	^{14}C
Сельскохозяйственные продукты [Agricultural products]			
Кабачки [Zucchini]	3	3,2±1,3	6,1±4,6
Капуста [Cabbage]	2	8,7±4,2	4,1±0,8
Картофель [Potato]	5	28,3±9,9	18,5±6,1
Огурцы [Cucumber]	2	5,9±4,5	4,6±3,9
Тыква [Pumpkin]	1	5,8±2,3	8,0±2,4
Молоко [Milk]	2	10,4±0,9	95,1±37,5
Вишня [Cherry]	1	8,6±3,4	5,2±1,6
Природные продукты [Natural products]			
Малина [Raspberry]	1	13,8±5,5	9,4±3,0
Черника [Blueberry]	1	2,5±0,8	6,1±1,8
Подосиновик [Orange-cap boletus]	1	5,8±2,3	6,7±2,0
Подберезовик [Rough boletus]	1	25,9±10,4	18,4±6,1
Карп [Carp]	1	8,1±2,4	–
Окунь [Perch]	1	7,9±2,3	–
Лещ [Bream]	1	23,6±7,1	72,6±36,1

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что, несмотря на наличие техногенного вклада, содержание радионуклидов ^3H и ^{14}C в пищевых продуктах находится на низком, близком к фоновому уровню Уральского региона [12, 20]. В то же время отмечено, что в сельскохозяйственных продуктах питания района БАЭС и ИРМ эти радионуклиды в большей степени накапливаются в картофеле и молоке. Природными продуктами с более высокими накопительными характеристиками являются пробы подберезовика и леща, в которых было отмечено и повышенное содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs .

Заключение

Анализ результатов многолетних мониторинговых исследований динамики содержания техногенных радионуклидов в местной пищевой продукции района Белоярской АЭС и Института реакторных материалов позволяет сделать вывод о том, что эксплуатация данных радиационно-опасных объектов в штатном режиме не приводит к регистрируемому увеличению содержания в продуктах питания ^{90}Sr и ^{137}Cs . Производимая в частном секторе населенных пунктов зоны влияния Белоярской АЭС пищевая продукция, а также природные продукты питания региона полностью соответствуют установленным в СанПиН нормативам по содержанию радионуклидов с большими коэффициентами запаса и не оказывают значимого влияния на формирование дополнительных дозовых нагрузок на население. Оценка первых лет эксплуатации реактора БН-800 также показывает, что нормализованные газоарозольные выбросы и жидкие сбросы нового энергоблока не привели к увеличению содержания техногенных радионуклидов в местных сельскохозяйственных и природных пищевых продуктах.

Предварительные исследования содержания ^3H и ^{14}C в продуктах питания района БАЭС показывают необходимость расширения мониторинговых работ по изучению накопления данных радиоизотопов в пищевой продукции. Научным комитетом по действию атомной радиации (НКДАР ООН) ^3H и ^{14}C отнесены к числу наиболее радиологически значимых в глобальном масштабе долгоживущих радионуклидов в ядерно-энергетическом цикле. В настоящее время проблему тритиевого и углеродного загрязнения экосистем в районах размещения предприятий ЯТЦ можно считать одной из ключевых в радиоэкологии. Поэтому изучение миграции этих радионуклидов в экосистемах и их накопление в пищевых продуктах следует продолжить.

Полученные результаты исследований можно использовать для информирования заинтересованных сторон о современной радиационной обстановке в районе БАЭС и ИРМ, расчета дозовых нагрузок на население от потребления местных сельскохозяйственных и природных пищевых продуктов, содержащих радионуклиды, а также оценки радиационных рисков от газоарозольных выбросов и жидких сбросов при эксплуатации радиационно-опасных объектов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 18-19-00016).

Литература

- Алексахин Р.М. Актуальные экологические проблемы ядерной энергетики // Атомная энергия. 2013. Т. 114, №5. С. 243-248.
- Крышев И.И., Рязанцев Е.П. Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России. М.: Издат, 2010. 496 с.
- Панов А.В., Исамов Н.Н., Кузнецов В.К. Радиационно-экологический мониторинг в регионе размещения Ростовской АЭС. Анализ результатов многолетних исследований // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, №2 (специальный выпуск). С. 54-65.
- Кузнецов В.К., Панов А.В., Санжарова Н.И., и др. Анализ результатов радиационно-экологического мониторинга в регионе размещения Курской АЭС // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, №2. С. 39-51.
- Трапезников А.В., Трапезникова В.Н., Коржавин А.В. Динамика радиозоологического состояния пресноводных экосистем, подверженных многолетнему воздействию атомной электростанции в границах наблюдаемой зоны // Радиационная биология. Радиоэкология. 2015. Т. 55, № 3. С. 302-313.
- Михайловская Л.Н., Гусева В.П., Рукавишникова О.В., Михайловская З.Б. Техногенные радионуклиды в почвах и растениях наземных экосистем в зоне воздействия атомных предприятий // Экология. 2020. № 2. С. 110-118.
- Чеботина М.Я., Лисовских В.Г., Реч Т.А., и др. О динамике прохождения жидких сбросов Белоярской АЭС через Ольховское болото // Экология. 1993. №2. С. 88-90.
- Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2004 году. Ежегодник. Обнинск: НПО «Тайфун», 2005. 287 с.
- Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2013 году. Ежегодник. Обнинск: НПО «Тайфун», 2014. 357 с.
- Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2018 году. Ежегодник. Обнинск: НПО «Тайфун», 2019. 324 с.
- Чеботина М.Я., Николлин О.А., Бондарева Л.Г., Ракитский В.Н. Тритий в моче людей в зоне влияния Белоярской АЭС // Радиационная гигиена. 2016. Т. 9, № 4. С. 87-92.
- Янов А.Ю., Востротин В.В., Финашов Л.В. Тритий в окружающей среде Уральского региона: обзор современного состояния и анализ перспектив изучения с позиций радиологической защиты // Человек. Спорт. Медицина. 2016. Т. 16, № 2. С. 85-99.
- Крышев И.И., Булгаков В.Г., Крышев А.И., и др. Мониторинг радиоактивности приземного слоя воздуха и атмосферных выпадений в районе расположения АЭС // Атомная энергия. 2019. Т. 126, № 4. С. 228-234.
- Трапезников А.В., Трапезникова В.Н. Радиоэкология пресноводных экосистем. Екатеринбург: Изд-во УрГХСХ, 2006. 390 с.
- Кадука М.В., Шутов В.Н., Брук Г.Я., Балонов М.И. Роль физико-химических свойств почвы в формировании радиоактивного загрязнения грибов // Радиационная гигиена. 2008. Т. 1, № 1. С. 32-35.
- Барковский А.Н., Барышков Н.К., Сапрыкин К.А., Титов Н.В. Оптимизация радиационного мониторинга, проводимого в субъектах Российской Федерации в рамках радиационно-гигиенической паспортизации // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 1. С. 36-48.
- Трапезникова В.Н., Трапезников А.В., Куликов Н.В. Накопление ^{137}Cs в промысловых рыбах водоема-охладителя Белоярской АЭС // Экология. 1984. № 6. С. 36-40.
- Линге И.И., Крышев И.И. Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Росатома. М.: «САН полиграфист», 2015. 296 с.
- Институт реакторных материалов. Отчет об экологической безопасности за 2013 г. Заречный, 2014. 27 с.
- Чеботина М.Я., Пономарева Р.П. Особенности накопления радиоуглерода в компонентах природной среды // Уральский геофизический вестник. 2007. № 4 (13). С. 86-94.

Поступила: 09.06.2020 г.

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

Трапезников Александр Викторович – доктор биологических наук, заведующий отделом континентальной радиоэкологии Института экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук. Екатеринбург, Россия

Исамов Низаметдин Низаметдинович – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Министерство образования и науки России, Обнинск, Россия

Коржавин Александр Васильевич – кандидат ветеринарных наук, старший научный сотрудник Института экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

Кузнецов Владимир Константинович – доктор биологических наук, главный научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Министерство образования и науки России, Обнинск, Россия

Гешель Ирина Викторовна – научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Министерство образования и науки России, Обнинск, Россия

Для цитирования: Панов А.В., Трапезников А.В., Исамов Н.Н., Коржавин А.В., Кузнецов В.К., Гешель И.В. Оценка влияния эксплуатации реактора БН-800 на содержание радионуклидов в местных продуктах питания района Белоярской АЭС // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 38–50. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-38-50

Assessment of the impact of the BN-800 reactor operation on the radionuclides content in local foodstuffs in the vicinity of Beloyarsk NPP

Alexey V. Panov ¹, Aleksandr V. Trapeznikov ², Nizametdin N. Isamov ¹, Aleksandr V. Korzhavin ², Vladimir K. Kuznetsov ¹, Irina V. Geschel ¹

¹All Russian Institute of radiology and agroecology, Obninsk, Russia

²Continental radioecology Department of the Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Sciences, Ural branch, Ekaterinburg, Russia

The research results are presented as an analysis of long-term data on the effect of gas-aerosol emissions and liquid discharges of Beloyarsk NPP and the Institute of Reactor Materials on the content of artificial radionuclides in local foodstuffs. It was noted that the distance and directions from radiation-hazardous facilities do not significantly affect the accumulation of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in potatoes and milk. The investigation of a wide range of foodstuffs from the private households of 23 settlements, forests, rivers, and a reservoir of the 30-km zone of the Beloyarsk NPP influence showed that the operation of the BN-800 reactor since 2016 did not lead to a registered increase in the content of artificial radionuclides in agricultural and natural foodstuffs. The maximum specific activities of ⁹⁰Sr (0.84 Bq/kg) and ¹³⁷Cs (0.26 Bq/kg) in root vegetables, potatoes, melons and vegetables were noted before the start of operation of the new power unit and were 45 and 300 times, respectively, lower than the current SanPiN standards. The highest content of ⁹⁰Sr in milk (0.41 Bq/l) was 60 times lower than the requirements of SanPiN, ¹³⁷Cs (0.11 Bq/l) was 900 times less than the permissible levels. In poultry, the specific activity of ⁹⁰Sr (0.2–0.3 Bq/kg) and ¹³⁷Cs (0.13–0.16 Bq/kg) has remained stable low in recent years, and the standardised content of ¹³⁷Cs in beef (maximum 0.12 Bq/kg) more than 1.5 thousand times lower than the requirements of SanPiN. The highest concentration of ¹³⁷Cs in wild berries, found in strawberries (1.27 Bq/kg), was 125 times less than SanPiN standards. The content of ⁹⁰Sr in mushrooms was at the level of 0.1–2.5 Bq/kg, the content of ¹³⁷Cs is slightly higher than – 0.6–5.8 Bq/kg. The maximum recorded specific activity of ¹³⁷Cs in mushrooms was more than 80 times lower than the requirements of SanPiN. During the observation period, a decrease of up to 20% or more in the content of artificial radionuclides in samples of 5 fish species was noted; the maximum levels of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in it were 14 times lower than the

Alexey V. Panov

All Russian Institute of radiology and agroecology

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

strictest SanPiN standards (using fish for baby food). Selective radiation monitoring of foodstuffs of Beloyarsk NPP area aimed at ^3H and ^{14}C showed that the content of these radionuclides in foodstuffs was low, close to the background level. In agricultural products, ^3H and ^{14}C accumulated to a greater extent in potatoes and milk, and in natural products – in rough boletus and bream. There was noted a need to continue research on the accumulation of ^3H and ^{14}C in foodstuffs of Beloyarsk NPP vicinity.

Key words: radiation safety, radiation monitoring, ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^3H , ^{14}C , agricultural foodstuffs, natural foodstuffs, radiation-hygienic assessment, long-term dynamics.

References

- Alexakhin RM. Topical environmental problems of nuclear power. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 2013;114(5): 243-248. (In Russian).
- Kryshev II, Ryazantsev EP. Environmental safety of Russia's nuclear power complex. M.: Izdat; 2010: 496. (In Russian).
- Panov AV, Isamov NN, Kuznetsov VK. Radioecological monitoring in the vicinity of Rostov NPP. The analysis of results of long-term investigations. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2(special issue)): 54-65. (In Russian).
- Kuznetsov VK, Panov AV, Sanzharaova NI, Isamov NN, Andreeva NV, Geshel IV, et al. The analysis of radioecological monitoring results in the vicinity of Kursk Nuclear Power Plant. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(2): 39-51. (In Russian).
- Trapeznikov AV, Trapeznikova VN, Korzhavin AV. Dynamics of radioecological state of the fresh-water ecosystems affected by a long-term impact from nuclear power plant in the frontiers of the zone under observation. *Radiatsionnaya biologiia. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 2015;55(3): 302-313. (In Russian).
- Mikhailovskaya LN, Guseva VP, Rukavishnikova OV, Mikhailovskaya ZB. Technogenic Radionuclides in Soils and Plants of Terrestrial Ecosystems in the Zone of Impact from Nuclear Enterprises. *Ekologiya = Russian Journal of Ecology*. 2020;51: 127-135. (In Russian).
- Chebotina MYu, Lisovskikh VG, Rech TA, Kononovich AL, Luppov VA, Rafikov EM, et al. On the Dynamics of Passage of Liquid Waste Discharge from the Beloyarskaya Nuclear Power Plant through the Olkhovskoe Bog. *Ekologiya = Ecology*. 1993;2: 88-90. (In Russian).
- The radiation situation in Russia and neighboring states in 2004. Yearbook. Obninsk: FSBI NPO «Typhoon»; 2005: 287. (In Russian).
- The radiation situation in Russia and neighboring states in 2013. Yearbook. Obninsk: FSBI NPO «Typhoon»; 2014: 357. (In Russian).
- The radiation situation in Russia and neighboring states in 2018. Yearbook. Obninsk: FSBI NPO «Typhoon»; 2019: 332. (In Russian).
- Chebotina MYa, Nikolin OA, Bondareva LG, Rakitsky VN. Tritium in urine of people living in the area of influence of the Beloyarskaya NPP. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene*. 2016;9(4): 87-92. (In Russian).
- Yanov AYu, Vostrotnin VV, Finashov LV. Environmental Tritium in the Ural Region: Current Situation and Radiation Protection Analysis of Research Perspectives. *Chelovek. Sport. Meditsina = Human. Sport. Medicine*. 2016;16(2): 85-99. (In Russian).
- Kryshev II, Bulgakov VG, Kryshev AI, Katkova MN, Sazykina TG, Pavlova NN, et al. Radioactivity monitoring of the surface air layer and atmospheric fallout near NPP. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 2019;126(4): 264-271. (In Russian).
- Trapeznikov AV, Trapeznikova VN. Radioecology of freshwater ecosystems. – Ekaterinburg: Publishing House of the Ural State Agricultural Academy; 2006: 390. (In Russian).
- Kaduka MV, Shutov VG, Bruk GYa, Balonov MI. Role of soil and climate characteristics in the formation of radioactive contamination of mushroom. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2008;1(1): 33-35. (In Russian).
- Barkovsky AN, Baryshkov NK, Saprykin KA, Titov NV. Optimization of radiation monitoring conducted in the subjects of the Russian Federation in the framework of radiation-hygienic certification. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(1): 36-48. (In Russian).
- Trapeznikova VN, Trapeznikov AV, Kulikov NV. The accumulation of ^{137}Cs by commercial fish in the cooling reservoir of the Beloyarsk Nuclear Power Plant. *Ekologiya = Ecology*. 1984;6: 36-40. (In Russian).
- Linge II, Kryshev II. Radioecological situation in the regions where Rosatom enterprises are located. Moscow: «SAM polygraphist»; 2015: 296. (In Russian).
- Institute of Reactor Materials. Environmental Safety Report 2013. Zarechny; 2014: 27. (In Russian).
- Chebotina MYa, Ponomareva RP. Peculiarities of radiocarbon accumulation in environmental components. *Uralskiy geofizicheskiy vestnik = Ural Geophysical Bulletin*. 2007;4(13): 86-94. (In Russian).

Received: June 09, 2020

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

Aleksandr V. Trapeznikov – Doctor of Biological Sciences, Head of the Continental radioecology Department of the Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Science, Ural branch, Ekaterinburg, Russia

Nizametdin N. Isamov – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher of All Russian Institute of radiology and agroecology, Obninsk, Russia

Aleksandr V. Korzhavin – PhD. Veterinary Sciences, Chief Science Officer of the Continental radioecology Department of the Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Science, Ural branch, Ekaterinburg, Russia

Vladimir K. Kuznetsov – Doctor of Biological Sciences, principal researcher of All Russian Institute of radiology and agroecology, Obninsk, Russia

Irina V. Geshel – Researcher of All Russian Institute of radiology and agroecology, Obninsk, Russia

For citation: Panov A.V., Trapeznikov A.V., Isamov N.N., Korzhavin A.V., Kuznetsov V.K., Geshel I.V. Assessment of the impact of the BN-800 reactor operation on the radionuclides content in local foodstuffs in the vicinity of Beloyarsk NPP. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No. 3. P. 38-50. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-38-50

Радоновое обследование в Челябинской области в 2008–2011 гг. Анализ территориальной вариабельности объемной активности радона

А.М. Маренный¹, Д.В. Кононенко², А.Е. Труфанова¹

¹ Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены Федерального медико-биологического агентства, Москва, Россия

² 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 период 2008–2011 гг. в рамках федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года» было проведено масштабное радоновое обследование на территории 29 муниципальных районов и городских округов Челябинской области. Результаты интегральных измерений объемной активности радона в воздухе помещений зданий различного назначения получены с помощью твердотельных трековых детекторов и аккумулярованы в базе данных «Радон» Научно-технического центра радиационно-химической безопасности и гигиены Федерального медико-биологического агентства России. В статье представлены результаты анализа полученных данных с точки зрения территориальной вариабельности объемной активности радона и результаты исследования связи этой величины с комплексом предикторов потенциальной радоноопасности. Результаты анализа данных показывают, что на всех изученных территориях (районы, городские округа и область в целом) распределение значений объемной активности радона в воздухе помещений соответствует логнормальному закону. Несмотря на то, что на десяти из них распределение лог-логистическим законом описывается несколько лучше, чем логнормальным, в среднем значения медиан для двух законов распределения не отличаются. Использование среднего арифметического значения объемной активности радона вместо медианы для расчета дозы внутреннего облучения приведет к необоснованному ее завышению в 1,4 раза. Ни на одной из изученных территорий медианное значение объемной активности радона не превышает 400 Бк/м³, при этом значение 0,95-квантиля распределения лежит в диапазоне от 96 до 1274 Бк/м³. Ожидаемая доля значений выше 400 Бк/м³ на разных территориях составляет от менее чем 0,1 до 26,8%. Наибольшие значения этого показателя получены для Сосновского, Каслинского и Брединского районов и Миасского г.о. (кроме г. Миасс). В работе проанализировано соответствие полученных результатов и карты эколого-радиогеохимического зонирования территории Челябинской области, составленной в 1993–1995 гг. на основе комплекса геологических предикторов потенциальной радоноопасности. Установлено, что медианные значения объемной активности радона в помещениях подвального, цокольного и первого этажей зданий, расположенных на территории трех из четырех эколого-радиогеохимических зон, достоверно не отличаются от медианного значения объемной активности радона в помещениях тех же этажей зданий, расположенных за пределами таких зон. Полученные результаты приводят к выводу, что возможность использования данной карты в качестве карты потенциальной радоноопасности представляется весьма сомнительной. Использованный в работе массив данных по Челябинской области содержит также обширный набор дополнительных характеристик каждой точки измерений, что дает возможность проанализировать и ряд других аспектов, связанных с изменчивостью объемной активности радона, например, сезонную и поэтажную вариабельность. В дальнейшем данный массив вполне может стать основой для расчетов региональных сезонных корректирующих коэффициентов, что позволит повысить достоверность оценки среднегодового значения ЭРОА изотопов радона по результатам измерений ограниченной длительности.

Ключевые слова: радон, объемная активность, радоновое обследование, трековый детектор, анализ данных, логнормальное распределение, геогенный радоновый потенциал, эколого-радиогеохимическая зона, Челябинская область.

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

Введение

Территория Российской Федерации характеризуется чрезвычайным разнообразием геологических, геофизических и геодинамических условий. Различное их сочетание приводит к тому, что отдельные участки территории характеризуются повышенной по сравнению с другими потенциальной радоноопасностью. На данный момент в действующих санитарных правилах и нормативах, касающихся природных источников ионизирующего излучения (НРБ-99/2009¹, ОСПОРБ 99/2010², СанПиН 2.6.1.2800-10³), отсутствует четкое определение понятия «потенциальная радоноопасность территории». Тем не менее, основной признак потенциальной радоноопасности, подлежащий определению при радиационном контроле земельных участков под строительство зданий⁴ (плотность потока радона с поверхности грунта), и нормативы его значения в документах установлены. При этом в определенных случаях в качестве дополнительного признака потенциальной радоноопасности может использоваться объемная активность (ОА) радона в воздухе подвальных помещений или/и помещений первых этажей близлежащих зданий⁵.

Отсутствие единой утвержденной терминологии приводит к тому, что в научных трудах используются различные трактовки этого и близкого к нему терминов. Например, в монографии [1] радоноопасная территория определена как «географическая область или административный район, для которого достоверно установлены значительно более высокие уровни ОА радона в воздухе зданий, чем в других частях страны или района». Такое определение, по сути, допускает признание радоноопасными территорий, где высокие уровни содержания радона в воздухе помещений могут быть обусловлены, к примеру, высоким содержанием ²²⁶Ra в материалах строительных конструкций зданий. В монографии [2] под

потенциальной радоноопасностью территории подразумевается «сочетание геологических, геодинамических, гидрогеологических условий, геофизических, радиационно-физических характеристик грунтов, способствующее повышенному выделению радона из грунтов, при которых среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность (ЭРОА) радона в помещениях зданий, расположенных на данной территории и никак не защищенных от поступления радона из грунта, может превышать допустимые санитарно-гигиенические уровни». Данное определение также подразумевает, что в качестве основного пути поступления радона в воздух помещений рассматривается его выделение из грунтов и подстилающих пород под зданиями. Однако, сравнивая эти определения, важно отметить главный момент: потенциальная радоноопасность может быть охарактеризована множеством предикторов, об адекватности применения которых много лет ведутся научные дискуссии (например, [3–8]), но выражается она в конечном итоге в повышенном по сравнению с неким средним уровнем содержания радона в воздухе помещений зданий, не имеющих радонозащиты. В свою очередь, это означает возможность косвенной оценки радоноопасности территории на основе результатов измерений ОА радона в воздухе помещений нижних этажей зданий.

Результаты интегральных измерений ОА радона в воздухе помещений на первых и цокольных этажах зданий положены в основу создаваемой с 2006 г. Европейской карты радона в помещениях [9–11] (European Indoor Radon Map [12]). В Российской Федерации подобной карты на данный момент не создано, а имеющиеся результаты радоновых обследований в отдельных регионах на Европейской карте не представлены. Между тем результаты уже проведенных обследований в сочетании с информацией об определенных предикторах потенци-

¹ Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 г. № 47. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 14 августа 2009 г., регистрационный № 14534. [Norms of radiation safety (NRB-99/2009). Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2523-09. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 07.07.2009 No. 47. Registered with the Ministry of justice of the Russian Federation on August 14, 2009, registration No. 14534. (In Russ.)]

² Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010): Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26.04.2010 г. № 40. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 11 августа 2010 г., регистрационный № 18115. [Basic sanitary rules for the provision of radiation safety (OSPORB 99/2010). Sanitary rules and norms SP 2.6.1.2612-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 26.04.2010 No. 40. Registered with the Ministry of justice of the Russian Federation on August 11, 2010, registration No. 18115. (In Russ.)]

³ Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения: Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2800-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 24.12.2010 г. № 171. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 27 января 2011 г., регистрационный № 19587. [Hygienic requirements for limiting public exposure to the natural sources of ionizing radiation. Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2800-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 24.12.2010 No. 171. Registered with the Ministry of justice of the Russian Federation on January 27, 2011, registration No. 19587. (In Russ.)]

⁴ Пункт 6.1 МУ 2.6.1.2398-08 «Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка земельных участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения в части обеспечения радиационной безопасности», утвержденных Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 02.07.2008 г. (далее – МУ 2.6.1.2398-08). [Radiation control and sanitary-epidemiological evaluation of land sites for construction of residential, public and industrial buildings and facilities. Guidelines MU 2.6.1.2398-08. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 02.07.2008 (hereinafter – MU 2.6.1.2398-08). Paragraph 6.1. (In Russ.)]

⁵ Пункт 6.13 МУ 2.6.1.2398-08. [Paragraph 6.13 of MU 2.6.1.2398-08 (In Russ.)].

альной радоноопасности могут использоваться для планирования более детальных исследований в субъектах РФ, районах или отдельных населенных пунктах. К примеру, сбор данных о результатах измерений содержания изотопов радона в воздухе помещений во всех регионах страны посредством формы федерального статистического наблюдения № 4-ДОЗ⁶, проводимый в рамках функционирования Единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан (ЕСКИД), позволил за 2001–2015 гг. выявить 52 населенных пункта в 19 субъектах РФ, в которых среднегодовая ЭРОА изотопов радона в отдельных типах жилых домов превышает гигиенический норматив 200 Бк/м³ [13].

К числу этих субъектов РФ относится и Челябинская область, территория которой на схеме районирования территории России по степени радоноопасности, представленной в работе [14], была классифицирована как «опасная». Челябинская область расположена, в основном, на восточных склонах Южного Урала и прилегающих территориях Зауральской низменности, на северо-западе захватывает часть горных хребтов Урала. Радоноопасность данной территории определяется в первую очередь ее геологическими особенностями: отсутствием или незначительной мощностью чехла рыхлых отложений и выходом на поверхность горных пород скального основания; широким распространением горных пород с повышенным содержанием радионуклидов (граниты, сиениты, углистые сланцы и пр.); многочисленными тектоническими нарушениями.

В период 2008–2011 гг. в рамках мероприятия 355 федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года» был проведен значительный объем интегральных измерений ОА радона в помещениях зданий различного назначения на территории Челябинской области. Для каждого обследованного помещения заполнялся так называемый «паспорт измерения», который содержал не только полные адресные данные, включая географические координаты здания, и сроки экспонирования детекторов, но и ряд строительно-конструкционных и иных характеристик: назначение здания, год постройки, этажность, основной материал строительных конструкций, тип системы отопления и вентиляции [15]. Столь обширный набор дополнительных сведений позволил в дальнейшем провести детальный анализ полученных данных, основанный на выделении из общего массива результатов измерений отдельных групп, объединенных определенным значением интересующей характеристики.

В статье представлены результаты анализа полученных данных с точки зрения территориальной вариативности ОА радона в воздухе помещений и результаты исследования связи этой величины с комплексом предикторов потенциальной радоноопасности.

Материалы и методы

В данной работе проведен анализ массива данных об ОА радона объемом 3223 значения из базы данных (БД) «Радон» ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России. Массив представляет собой результаты измерений ОА радона в воздухе помещений зданий различного назначения (жилых, общественных и производственных) на территории Челябинской области, проведенных в период с 2008 по 2011 г. с помощью комплекта аппаратуры для измерения ОА радона в воздухе трековым методом «ТРЕК-РЭИ-1М»⁷. Перед началом статистической обработки были проведены валидация и верификация результатов измерений [16]. В пробоотборных камерах типа «РЭИ-4» в качестве трекового детектора (ТД) используется нитроцеллюлозная пленка Kodak LR-115 Type II. Для данного ТД производителем комплекта аппаратуры указан предел насыщения, равный 120 кБк-сутки/м³. После процедуры валидации 42 результата измерений (1,3% от первоначального количества) были отфильтрованы как недостоверные. Эта часть данных относится, в основном, к зданиям, где были зафиксированы наиболее высокие значения ОА радона, т.е. зданиям, потенциально нуждающимся в разработке рекомендаций по проведению радонозащитных мероприятий. Выход результатов измерений за границы метрологических характеристик средства измерений исключает возможность их использования в процедуре анализа данных, однако подобные результаты можно использовать как «индикаторные» при планировании дальнейших детальных обследований отдельных зданий. На этапе верификации, в рамках задач данного исследования, из массива были исключены 72 результата измерений в подвалах и технических помещениях на цокольных этажах. Таким образом, после процедур валидации и верификации данных объем массива составил 3109 значений.

Описание массива данных приведено в таблице 1, при этом проведена первичная стратификация массива по признаку «период измерений». Деление на сезоны принято календарное (зима – декабрь, январь, февраль; весна – март, апрель, май; лето – июнь, июль, август; осень – сентябрь, октябрь, ноябрь). Сезон каждого измерения определялся как сезон, соответствующий дню середины интервала экспонирования ТД.

⁶ Форма федерального статистического наблюдения № 4-ДОЗ. Сведения о дозах облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона: Методические рекомендации МР 2.6.1.0088-14. Утверждены врио Главного государственного санитарного врача Российской Федерации 18.03.2014 г. [Federal statistical form No 4-DOZ. Data on doses of public exposure to natural and technologically enhanced radiation background. Guidelines MR 2.6.1.0088-14. Approved by the acting Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 18.03.2014. (In Russ.)]

⁷ Радон. Измерение объемной активности в воздухе помещений интегральным трековым методом: Методика измерений. Разработана ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России, ООО «ГК РЭИ». Аттестована ФГУП ВНИИФТРИ, свидетельство № 40090.2И385 от 16.07.2012 г. [Measurements of radon concentration with SSNTDs. Guidelines. Developed by Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene (Federal Medical-Biological Agency of Russia) and LLC "REI Group of Companies". Certified by VNIIFTRI, certificate No. 40090.2И385 dated 16.07.2012. (In Russ.)]

Таблица 1
Распределение количества измерений по периодам измерений

[Table 1
Distribution of the number of measurements by measurement period]

Период измерений [Measurement period]	Количество измерений [Number of measurements]
Лето – осень 2008 г. [Summer – Autumn 2008]	571
Зима-весна 2008 – 2009 гг. [Winter – Spring 2008/2009]	667
Лето – осень 2009 г. [Summer – Autumn 2009]	799
Зима – весна 2009 – 2010 гг. [Winter – Spring 2009/2010]	775
Лето – осень 2010 г. [Summer – Autumn 2010]	286
Весна 2011 г. [Spring 2011]	11
ВСЕГО лето – осень [Summer-Autumn, subtotal]	1656
ВСЕГО зима – весна [Winter-Spring, subtotal]	1453
ИТОГО [TOTAL]	3109

На основе информации о назначении здания, содержащейся в таблицах БД «Радон», была дополнительно произведена классификация зданий по типам, которые отражают основные режимы эксплуатации, влияющие на характер накопления радона в воздухе помещений: жилые (гостиница, детский дом, жилой дом, интернат, общежитие, приют, санаторий), общественные (административное здание, аптека, бассейн, библиотека, детский сад, магазин, медучреждение, образовательное учреждение, общественное здание, спорткомплекс, учреждение, храм, школа) и производственные (офис, предприятие, промпредприятие, другое).

За период 2008–2011 гг. интегральные измерения ОА радона были проведены в 29 муниципальных районах и городских округах Челябинской области. Распределение количества проведенных в них измерений по типам зданий приведено в таблице 2. Для Миасского г.о., в котором было проведено наибольшее количество измерений и в состав которого входят помимо г. Миасс еще 28 населенных пунктов, массив дополнительно был разбит на две части: непосредственно г. Миасс и прочие относящиеся к городскому округу населенные пункты.

На рисунке 1 приведена административная карта Челябинской области, на которой оранжевым цветом выделены районы и городские округа, в которых было проведено не менее 100 измерений, зеленым – от 10 до 99 измерений, желтым – менее 10 измерений. Остальные районы и городские округа пока что измерениями охвачены не были.

Таблица 2
Распределение количества измерений по районам и типам зданий

[Table 2
Distribution of the number of measurements by districts and the purpose of the building]

Район [District]	Количество измерений [Number of measurements]			
	Общественные [Public buildings]	Жилые [Dwellings]	Производственные [Industrial buildings]	Итого [Subtotal]
Агаповский [Agapovsky]	2	6	0	8
Ашинский [Ashinsky]	6	20	1	27
Брединский [Bredinsky]	69	43	3	115
Верхнеуральский [Verkhneuralsky]	11	6	2	19
Верхнеуфалейский г.о. [Verkhneufaleysky urban dist.]	11	44	13	68
Златоустовский г.о. [Zlatoustovsky urban dist.]	268	63	2	333
Карабашский г.о. [Karabashsky urban dist.]	1	32	0	33
Каслинский [Kaslinsky]	8	72	6	86
Копейский г.о. [Kopeysky urban dist.]	0	1	0	1
Коркинский [Korkinsky]	0	2	0	2
Красноармейский [Krasnoarmeysky]	0	1	0	1

Район [District]	Количество измерений [Number of measurements]			
	Общественные [Public buildings]	Жилые [Dwellings]	Производственные [Industrial buildings]	Итого [Subtotal]
Кыштымский г.о. [Kyshtymsky urban dist.]	21	67	2	90
Магнитогорский г.о. [Magnitogorsky urban dist.]	19	42	1	62
Миасский г.о., г. Миасс [Miassky urban dist., Miass city]	72	509	53	634
Миасский г.о., кроме г. Миасс [Miassky urban dist., except Miass city]	23	131	3	157
Нязепетровский [Nyazepetrovsky]	6	3	1	10
Пластовский [Plastovsky]	6	108	8	122
Саткинский [Satkinsky]	28	1	0	29
Снежинский г.о. [Snezhinsky urban dist.]	0	1	0	1
Сосновский [Sosnovsky]	0	21	2	23
Трёхгорный г.о. [Tryokhgornyy urban dist.]	14	5	1	20
Троицкий г.о. [Troitsky urban dist.]	0	11	4	15
Увельский [Uvelsky]	0	10	0	10
Уйский [Uysky]	14	78	0	92
Усть-Катавский г.о. [Ust-Katavsky urban dist.]	13	2	0	15
Чибаркульский [Chebarkulsky]	1	13	0	14
Чибаркульский г.о. [Chebarkulsky urban dist.]	171	114	14	299
Челябинский г.о. [Chelyabinsky urban dist.]	553	181	16	750
Чесменский [Chesmensky]	35	34	3	72
Южноуральский г.о. [Yuzhnouralsky urban dist.]	0	1	0	1
ВСЕГО [TOTAL]	1352	1622	135	3109

Для 6 районов (Агаповский, Копейский г.о., Коркинский, Красноармейский, Снежинский г.о., Южноуральский г.о.), в каждом из которых было проведено менее 10 измерений, отдельный анализ данных не проводился. Результаты измерений в этих районах входили в массивы, сформированные на основе иных признаков.

Как правило, ОА радона строго следует логнормальному закону до определенного уровня, выше которого начинают наблюдаться отклонения (выбросы и экстремальные значения) [17, 18]. Присутствие в массиве данных подобных результатов в определенной степени искажает оценку среднего значения, в зависимости от того, какая мера центральной тенденции выбрана для характеристики результа-

тов. Использование методов анализа выбросов позволяет устранить верхние экстремальные значения (ВЭЗ) и тем самым уточнить параметры и характеристики распределения. Важно подчеркнуть, что устранение ВЭЗ из анализируемого массива не обязательно означает, что данные результаты являются следствием ошибки при проведении измерений (хотя такой вариант исключать нельзя). С одной стороны, классификация результата как ВЭЗ говорит о необходимости его перепроверки (например, повторного подсчета поверхностной плотности треков на экспонированном ТД), а с другой стороны, является сигналом к тому, чтобы уделить зданию, где получен данный результат, более пристальное внимание при дальнейших обследованиях.

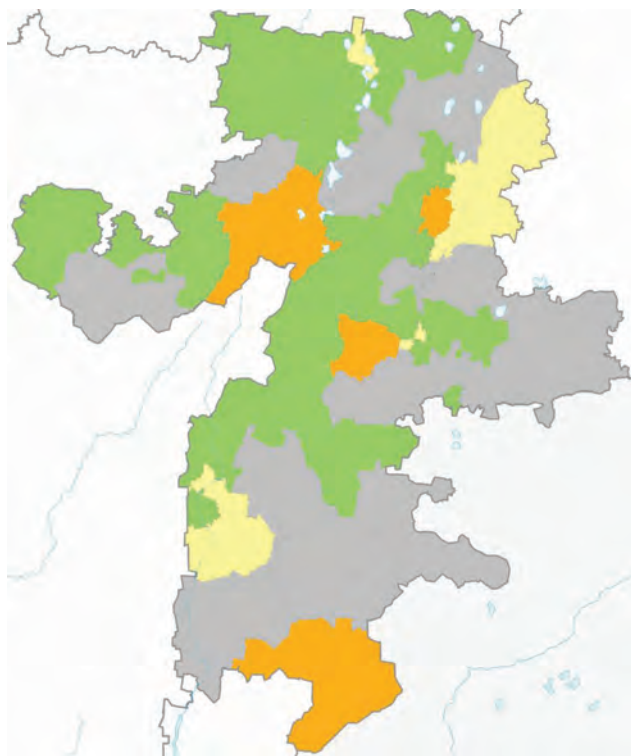


Рис. 1. Карта охвата районов и городских округов Челябинской области измерениями ОА радона (оранжевый – не менее 100 измерений; зеленый – от 10 до 99; желтый – менее 10; серый – измерений не было)

[Fig. 1. Coverage of the districts of the Chelyabinsk Oblast with indoor radon concentration measurements (orange – 100 or more measurement points; green – from 10 to 99; yellow – 10 or less; grey – no measurements at all)]

Обработка каждого массива данных, получаемого после стратификации более крупного массива по какому-либо признаку, включала в себя комплекс процедур, представляющий собой дальнейшее системное развитие подхода, описанного в работе [16]: анализ на наличие выбросов, идентификация и устранение ВЭЗ, анализ характера распределений значений ОА радона и натурального логарифма ОА радона и степени их соответствия некоторым законам. Для визуализации результатов обработки строились три диаграммы (для каждого массива): Q-Q диаграмма (диаграмма квантиль-квантиль или нормальный вероятностный график) с выделением ВЭЗ, гистограмма частотного распределения (ГЧР) значений ОА радона и ГЧР значений натурального логарифма ОА радона с наложением кривых, соответствующих некоторым законам распределений.

В качестве метода анализа на наличие выбросов был использован модифицированный тау-тест Томпсона [19, 20], который рекомендуется к применению, например, в американском национальном стандарте по оценке неопределенностей ASME PTC 19.1-2005 [21].

По массиву значений $Y_i = \ln(X_i)$ рассчитывается среднее арифметическое и стандартное отклонение σ . Далее для каждого значения $\bar{Y}_i$ рассчитывается абсолютное отклонение от среднего арифметического:

$$\delta_i = |Y_i - \bar{Y}| \quad (1)$$

Значение критерия τ рассчитывается по следующей формуле:

$$\tau = \frac{t_{\alpha/2} \cdot (n-1)}{\sqrt{n(n-2+t_{\alpha/2}^2)}} \quad (2)$$

где n – количество значений в массиве;

$t_{\alpha/2}$ – квантиль распределения Стьюдента с $n-2$ степенями свободы уровня $1-\alpha/2$.

Идентификация значений как выбросов представляет собой итерационный процесс (по одному значению за итерацию). На каждой итерации тестируется значение с максимальным отклонением δ_i . Значение считается выбросом, если выполняется следующее условие:

$$\delta_i > \tau \cdot \sigma \quad (3)$$

Поскольку в данной работе интерес представляло устранение не просто выбросов, а ВЭЗ, α было принято равным 0,005. Результаты тау-теста использовались не для устранения выбросов, а лишь для дополнительной проверки того, что значения, идентифицированные далее методом Тьюки как ВЭЗ, действительно являются выбросами.

Идентификация ВЭЗ проводилась модифицированным методом Тьюки [22]. Значение Y_i из нормального распределения считается экстремальным, если оно превышает граничное значение Y_{EV} , определяемое как

$$Y_{EV} = Q_3 + k(Q_3 - Q_1) \quad (4)$$

где Q_1 и Q_3 – нижний и верхний квартили распределения соответственно;

k – параметр идентификации.

Граничное значение X_{EV} для логнормального распределения определяется как $\exp(Y_{EV})$.

В классическом методе Тьюки [23, 24] параметр k равен 1,5 для выбросов и 3,0 для экстремальных значений. В модифицированном методе значение параметра k зависит от объема выборки и лежит в диапазоне от 2,1 до 2,4. Классификация большого количества точек как ВЭЗ позволяет сделать правый хвост распределения не таким тяжелым и тем самым упростить идентификацию закона распределения, описывающего основную часть значений в выборке.

Устранение ВЭЗ, идентифицированных методом Тьюки, представляет собой, как и в случае тау-теста Томпсона, итерационный процесс. Если идентифицировано более одного ВЭЗ, то после устранения наибольшего ВЭЗ из массива заново определяются квартили распределения, и производится расчет нового граничного значения X_{EV} . Данная последовательность операций повторяется, пока не будет выполняться условие $X_i \leq X_{EV}$ для всех i от 1 до N , где N – объем массива. По мере исключения наибольших ВЭЗ из массива в качестве таковых могут быть идентифицированы дополнительные значения, не являвшиеся ВЭЗ в исходном массиве.

В работе [16] был использован метод визуального анализа Q-Q диаграмм, который позволял оценить соответствие распределения значений ОА радона логнормальному закону как условно «хорошее» или «практически идеальное». В данной работе этот метод был модифици-

рован с целью придания ему большей математической строгости. Анализ массивов данных включал проверку четырех гипотез с помощью теста Колмогорова – Смирнова (так называемый Goodness-of-Fit Test): соответствие распределения значений ОА радона логнормальному и лог-логистическому (так называемого распределение Фиска [25]) законам и соответствие распределения значений натурального логарифма ОА радона нормальному и логистическому законам. Результаты проверки дополнялись результатами расчета натурального логарифма функции правдоподобия (так называемой Log-likelihood function), ранжирующими подбираемые распределения по степени соответствия реальным данным.

Лог-логистическое распределение – это вероятностное распределение случайной величины, натуральный логарифм которой имеет логистическое распределение (аналогично паре логнормальное – нормальное). По форме оно похоже на логнормальное распределение, но имеет более тяжелые хвосты. Логистическое распределение, в свою очередь формой напоминает нормальное, но опять же имеет более тяжелые хвосты и больший коэффициент эксцесса. Данное распределение часто используется в качестве аппроксимации других симметричных распределений (в частности, нормального) из-за того, что его кумулятивная (интегральная) функция распределения может быть представлена в виде выражения в замкнутой форме (т.е. комбинации конечного числа стандартных операций и функций, исключая пределы, дифференцирование, интегрирование и некоторые другие).

В соответствии с описанным модифицированным методом «практически идеальному» совпадению распределения значений ОА радона с логнормальным соответствует следующая ситуация:

- для массива значений ОА радона p -значение (статистическая мощность) теста Колмогорова – Смирнова равно или превышает 0,05 для гипотезы принадлежности выборки к логнормальному распределению, при этом максимальное значение натурального логарифма функции правдоподобия получено для логнормального распределения;

- для массива значений натурального логарифма ОА радона p -значение теста Колмогорова-Смирнова равно или превышает 0,05 для гипотезы принадлежности выборки к нормальному распределению, при этом максимальное значение натурального логарифма функции правдоподобия получено для нормального распределения.

«Хорошему» совпадению распределения значений ОА радона с логнормальным соответствует следующая ситуация:

- для массива значений ОА радона p -значение теста Колмогорова – Смирнова равно или превышает 0,05 для гипотезы принадлежности выборки к логнормальному распределению, при этом максимальное значение натурального логарифма функции правдоподобия получено для лог-логистического распределения;

- для массива значений натурального логарифма ОА радона p -значение теста Колмогорова – Смирнова равно или превышает 0,05 для гипотезы принадлежности выборки к нормальному распределению, при этом максимальное значение натурального логарифма функции правдоподобия получено для логистического распределения.

Если p -значение теста Колмогорова – Смирнова хотя бы для одного массива составляет менее 0,05, то массив с вероятностью 95% не принадлежит соответствующему распределению и является выборкой из так называемого смешанного распределения, т.е. составленного из отдельных распределений с существенно отличающимися параметрами [16, 17]. Эти отдельные распределения описывают части массива результатов измерений, полученных при разных условиях. Такими условиями могут являться время года, тип помещения (жилое, общественное, производственное), конструктивные особенности здания, а также географическое положение (расположение зданий на территориях с отличающейся потенциальной радоноопасностью). В этом случае требуется дальнейшая стратификация массива по дополнительному признаку. В данной работе подобные массивы обнаружены не были.

Результаты и обсуждение

Анализ полученных 26 массивов показал, что на всех обследованных территориях (районы, городские округа и область в целом) распределение значений ОА радона в воздухе помещений соответствует логнормальному закону, при этом на 10 из них (Челябинская обл., Верхнеуфалейский г.о., Карабашский г.о., Магнитогорский г.о., Саткинский, Увельский, Уйский, Усть-Катавский г.о., Чебаркульский г.о., Чесменский) лог-логистическим законом распределение описывается несколько лучше, чем логнормальным.

В случае лог-логистического распределения значений ОА радона медиана (которая используется в качестве робастной меры центральной тенденции) определяется как $\exp(\mu_L)$, где μ_L – среднее для соответствующего логистического распределения значений натуральных логарифмов ОА радона (по аналогии с парой нормальное–логнормальное). Стоит отметить, что автоматизация расчета μ_L затруднена, поскольку это значение является параметром кривой, подобранной статистическим пакетом в процессе анализа массивов на соответствие распределений выбранным законам. Чтобы выяснить, обосновано ли в данном случае рассчитывать медиану тем же методом, который используется для логнормального распределения (как $\exp(\mu_N)$, где μ_N – среднее для соответствующего нормального распределения значений натуральных логарифмов ОА радона), для вышеуказанных 10 массивов был произведен расчет медианы обоими методами, дополненный расчетом относительной разницы значений медиан. Результаты расчета представлены в таблице 3.

Получено, что значение медианы, рассчитанное как $\exp(\mu_L)$, в среднем не отличается от значения, рассчитанного как $\exp(\mu_N)$. Результаты расчета характеристик всех 26 массивов приведены в таблице 4. Следует подчеркнуть, что соответствие распределений значений ОА радона логнормальному закону однозначно говорит о том, что использование среднего арифметического значения вместо медианы для оценки доз внутреннего облучения населения за счет радона и для оценки рисков для здоровья населения при облучении радоном в корне неверно и ведет к необоснованному завышению этих показателей. На этот факт уже обращалось внимание в публикации [16], где среднее завышение составило 1,3 раза. В данной работе получено среднее завышение, равное 1,4 раза.

Таблица 3
Результаты расчета относительной разницы значений
медиан, полученных двумя способами

[Table 3
Median values of indoor radon concentrations calculated from
normal (μ_N) and logistic (μ_L) fitted distributions and relative
difference between the medians]

Массив [Dataset]	Медиана, Бк/м ³ [Median, Bq/m ³]		Разница, % [Difference, %]
	exp(μ_N)	exp(μ_L)	
Челябинская область [Chelyabinsk Oblast]	98	96	-2
Верхнеуфалейский г.о. [Verkhneufaleysky urban dist.]	123	124	1
Карабашский г.о. [Karabashsky urban dist.]	46	48	4
Магнитогорский г.о. [Magnitogorsky urban dist.]	42	43	2
Саткинский [Satkinsky]	89	87	-2
Увельский [Uvelsky]	53	52	-2
Уйский [Uysky]	166	169	2
Усть-Катавский г.о. [Ust- Katafsky urban dist.]	108	105	-3
Чебаркульский г.о. [Chebarkulsky urban dist.]	127	124	-2
Чесменский [Chesmensky]	140	143	2
В СРЕДНЕМ [AVERAGE]			0

Среднее значение ОА радона – это важный показатель, позволяющий оценить степень «радоновой пробле-

мы» в отдельных районах, городских округах и населенных пунктах, но не единственный и, возможно, не самый выразительный. При принятии решений о выделении сил и средств для проведения более масштабных радоновых обследований с целью выявления зданий, в которых требуется осуществление радонозащитных мероприятий, первостепенную роль должна играть доля результатов измерений ОА радона на определенной территории, которая превышает 400 Бк/м³ (с учетом того, что нормируемым в России показателем радиационной безопасности является среднегодовая ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений⁸, равная ЭРОА_{РН}+4,6·ЭРОА_{ТН}, которая в жилых и общественных зданиях не должна превышать 200 Бк/м³, а стандартное значение коэффициента равновесия между радоном и его короткоживущими дочерними продуктами распада принято равным 0,5⁹).

Важно отметить, что расчет этого показателя, выполненный на основе результатов уже проведенных обследований (обозначим его d_{400+}), далеко не всегда отражает реальную ситуацию на обследуемой территории, т.к. это тесно связано с вопросом методически правильного формирования случайной и представительной выборки зданий¹⁰. Практика проведения радоновых обследований в России показывает, что территориальное распределение точек измерения носит, как правило, псевдослучайный характер, когда к установке детекторов привлекаются сотрудники дружественных организаций, либо детекторы располагаются во всех зданиях определенного назначения (например, дошкольных и школьных образовательных учреждениях [26]) на обследуемой территории, и по умолчанию принимается, что их количество и расположение отражает в определенной мере территориальное

Таблица 4
Характеристики массивов данных об ОА радона в воздухе помещений в обследованных районах и городских округах

[Table 4
Indoor radon concentrations in surveyed districts: parameters of the datasets]

Массив [Dataset]	N	GM(CI95)	GSD	X ₉₀	X ₉₅	AM
Челябинская область [Chelyabinsk Oblast]	3109	98 (95–101)	2,5	324	455	158
Ашинский [Ashinsky]	27	57 (43–76)	2,1	148	193	76
Брединский [Bredinsky]	115	183 (156–216)	2,4	575	794	283
Верхнеуральский [Verkhneuralsky]	19	88 (64–120)	2,0	215	278	113
Верхнеуфалейский г.о. [Verkhneufaleysky urban dist.]	67	123 (105–144)	1,9	287	365	151

⁸ Пункт 5.3.3 НРБ-99/2009. [Paragraph 5.3.3 of NRB-99/2009. (In Russ.)]

⁹ Пункт 6.3 МУ 2.6.1.2838-11 «Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после окончания их строительства, капитального ремонта, реконструкции по показателям радиационной безопасности», утвержденных Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 28.01.2011 г. (далее – МУ 2.6.1.2838-11). [Radiation control and sanitary-epidemiological evaluation of residential, public and industrial buildings and facilities after finishing their construction, capital repair, reconstruction. Guidelines MU 2.6.1.2838-11. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 28.01.2011 (hereinafter – MU 2.6.1.2838-11). Paragraph 6.3. (In Russ.)].

¹⁰ Выборочное обследование жилых зданий для оценки доз облучения населения: Методические рекомендации МР 11-2/206-09. Утверждены заместителем Главного государственного санитарного врача Российской Федерации 29.08.2000 г. [Sample survey of residential buildings for assessment of the radiation doses to the population. Guidelines MR 11-2/206-09. Approved by the Deputy Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 29.08.2000. (In Russ.)]

Массив [Dataset]	N	GM(CI95)	GSD	X_{90}	X_{95}	AM
Златоустовский г.о. [Zlatoustovsky urban dist.]	332	93 (85–101)	2,2	259	347	132
Карабашский г.о. [Karabashsky urban dist.]	33	46 (36–59)	2,1	118	154	59
Каслинский [Kaslinsky]	86	151 (115–199)	3,7	796	1274	330
Кыштымский г.о. [Kyshtymsky urban dist.]	90	87 (73–104)	2,4	263	360	123
Магнитогорский г.о. [Magnitogorsky urban dist.]	62	42 (35–50)	2,0	102	132	53
Миасский г.о. [Miassky urban dist.]	791	88 (82–95)	2,7	310	442	151
Миасский г.о., г. Миасс [Miassky urban dist., Miass city]	634	77 (72–83)	2,5	250	348	122
Миасский г.о., кроме г. Миасс [Miassky urban dist., except Miass city]	157	153 (130–180)	2,8	578	843	268
Нязепетровский [Nyazepetrovsky]	10	55 (38–78)	1,8	114	140	62
Пластовский [Plastovsky]	122	137 (117–159)	2,4	410	560	198
Саткинский [Satkinsky]	29	89 (69–114)	2,0	218	281	119
Сосновский [Sosnovsky]	23	206 (133–318)	2,9	809	1191	389
Трёхгорный г.о. [Tryokhgornyy urban dist.]	20	45 (34–60)	2,0	106	136	55
Троицкий г.о. [Troitsky urban dist.]	15	84 (58–122)	2,1	215	280	106
Увельский [Uvelsky]	10	53 (43–67)	1,4	84	96	57
Уйский [Uysky]	92	166 (142–194)	2,1	441	582	218
Усть-Катавский г.о. [Ust-Katavsky urban dist.]	15	108 (81–143)	1,7	220	269	128
Чебаркульский [Chebarkulsky]	14	74 (40–138)	3,3	337	518	124
Чебаркульский г.о. [Chebarkulsky urban dist.]	299	127 (114–140)	2,5	403	559	194
Челябинский г.о. [Chelyabinsky urban dist.]	750	86 (81–91)	2,3	256	349	127
Чесменский [Chesmensky]	72	140 (116–169)	2,3	399	537	191

Обозначения в табл. 4: N – количество значений в массиве после устранения ВЗЗ; GM(CI95) – медиана распределения значений ОА радона (в скобках – 95% доверительный интервал), Бк/м³; GSD – геометрическое стандартное отклонение; X_{90} – 0,90-квантиль распределения, Бк/м³; X_{95} – 0,95-квантиль распределения, Бк/м³; AM – среднее арифметическое значение ОА радона, Бк/м³. [Designations in table 4: N – number of measurements after discarding outliers (extremely high values); GM(CI95) – median (with 95% confidence interval), Bq/m³; GSD – geometric standard deviation; X_{90} – 90th percentile, Bq/m³; X_{95} – 95th percentile, Bq/m³; AM – arithmetic mean, Bq/m³.]

распределение численности населения. В этом случае в выборке может оказаться как неадекватно много зданий с высоким содержанием радона в воздухе, так и неадекватно мало.

Альтернативой расчету d_{400+} является определение ожидаемой доли значений ОА радона выше 400 Бк/м³ (обозначим ее P_{400+}) на основе полученного

нормального распределения значений натурального логарифма ОА радона. С помощью метода стандартизации (т.н. z-преобразования) распределение приводится к стандартному нормальному ($\mu=0$, $\sigma=1$), рассчитывается z-значение, соответствующее ОА радона 400 Бк/м³, и далее определяется вероятность того, что ОА радона превысит этот порог. Результаты расчета d_{400+} и P_{400+} для

всех 26 массивов представлены в табл. 5 и показывают, что разница между ожидаемой долей P_{400+} и полученной в конкретной выборке долей d_{400+} может быть как положительной (в том случае, когда в выборку попало недостаточно зданий с высоким содержанием радона в воздухе), так и отрицательной (в том случае, когда в выборку попало слишком много таких зданий) и асимптотически приближается к нулю с увеличением объема выборки (рис. 2). При этом ожидаемая доля никогда не может быть равна нулю в силу своего вероятностного характера.

Таблица 5

Результаты расчета доли значений ОА радона выше 400 Бк/м³ в обследованных районах и городских округах

[Table 5]

Fraction of indoor radon concentrations above 400 Bq/m³ in surveyed districts]

Массив [Dataset]	N	P_{400+} , %	d_{400+} , %
Челябинская область [Chelyabinsk Oblast]	3109	6,6	7,1
Ашинский [Ashinsky]	27	0,4	0
Брединский [Bredinsky]	115	19,2	19,1
Верхнеуральский [Verkhneuralsky]	19	1,5	0
Верхнеуфалейский г.о. [Verkhneufaleysky urban dist.]	67	3,8	6,0
Златоустовский г.о. [Zlatoustovsky urban dist.]	332	3,4	4,8
Карабашский г.о. [Karabashsky urban dist.]	33	0,2	0
Каслинский [Kaslinsky]	86	22,7	19,8
Кыштымский г.о. [Kyshtymsky urban dist.]	90	3,9	1,1
Магнитогорский г.о. [Magnitogorsky urban dist.]	62	< 0,1	0
Миасский г.о. [Miassky urban dist.]	791	6,2	7,7
Миасский г.о., г. Миасс [Miassky urban dist., Miass city]	634	3,6	5,5
Миасский г.о., кроме г. Миасс [Miassky urban dist., except Miass city]	157	17,6	16,6
Нязепетровский [Nyazepetrovsky]	10	< 0,1	0
Пластовский [Plastovsky]	122	10,6	9,0
Саткинский [Satkinsky]	29	1,6	3,4
Сосновский [Sosnovsky]	23	26,8	21,7
Трёхгорный г.о. [Tryokhgornyy urban dist.]	20	< 0,1	0
Троицкий г.о. [Troitsky urban dist.]	15	1,7	0
Увельский [Uvelsky]	10	< 0,1	0
Уйский [Uysky]	92	12,5	7,6
Усть-Катавский г.о. [Ust-Katavsky urban dist.]	15	0,9	6,7
Чебаркульский [Chebarkulsky]	14	7,7	0

Окончание таблицы 5

Массив [Dataset]	N	P_{400+} , %	d_{400+} , %
Чебаркульский г.о. [Chebarkulsky urban dist.]	299	10,2	11,4
Челябинский г.о. [Chelyabinsky urban dist.]	750	3,6	4,3
Чесменский [Chesmensky]	72	10,0	8,3

N – объем выборки (количество значений в массиве после устранения ВЭЗ); P_{400+} – ожидаемая доля значений ОА радона выше 400 Бк/м³; d_{400+} – полученная в выборке доля значений ОА радона выше 400 Бк/м³, Бк/м³. [Designations in table 5: N – number of measurements after discarding outliers (extremely high values); P_{400+} – fraction of concentrations above 400 Bq/m³ expected from the fitted distribution; d_{400+} – fraction of concentrations above 400 Bq/m³ calculated from the dataset.]

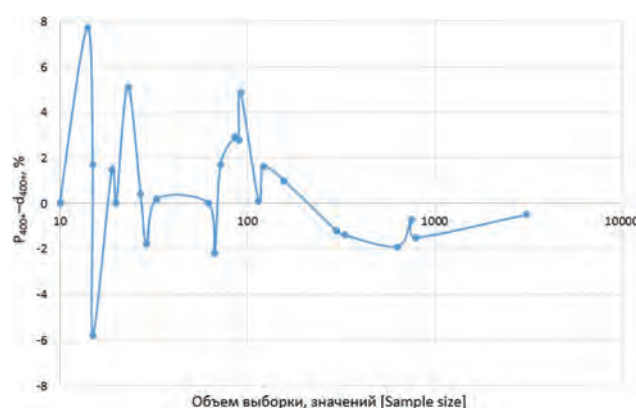
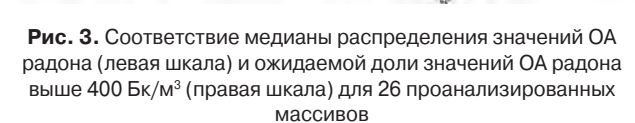


Рис. 2. Разница между ожидаемой долей (P_{400+}) и полученной в выборке долей (d_{400+}) значений ОА радона выше 400 Бк/м³ для 26 проанализированных массивов

[Fig. 2. Relative difference between fraction of concentrations above 400 Bq/m³ expected from the fitted distribution (P_{400+}) and calculated from the dataset (d_{400+}) for 26 surveyed districts]

Особый интерес представляет совместное рассмотрение средних значений ОА радона и значений P_{400+} в изученных районах и городских округах. Соответствующая диаграмма представлена на рисунке 3. Несмотря на то, что в целом более высоким значениям медианы соответствуют более высокие значения P_{400+} , наблюдается и несколько резких отклонений от этой тенденции (Чебаркульский и Каслинский районы). Данные всплески надо расценивать как явный сигнал к тому, чтобы уделить этим районам больше внимания при дальнейших обследованиях.

По результатам обследования отдельные значения ОА радона, превышающие 400 Бк/м³, зафиксированы в 28 населенных пунктах в 15 районах и городских округах области, при этом наиболее высокие значения, превышающие 1000 Бк/м³, зафиксированы в 14 населенных пунктах (выделены в списке жирным шрифтом): Агаповском (п. Озерный), Брединском (**п. Бреды**, Комсомольский, **Коряжный**, Рымникский), Верхнеуфалейском г.о. (**г. Верхний Уфалей**, п. Октябрьский), Златоустовском г.о. (**г. Златоуст**), Каслинском (г. Касли, **рп Вишневогорск**), Кыштымском г.о. (п. Слюдорудник), Миасском г.о. (**г. Миасс**, с. Новоандреевка, **п. Северные Печи**, **п. ж/д ст. Сыростан**, с. Сыростан, **п. Тургоряк**), Пластовском (г. Пласт, п. Михайловский), Саткинском (г. Сатка),



[Fig. 3. Median values of indoor radon concentrations (left scale, green bars) and fraction of concentrations above 400 Bq/m³ expected from the fitted distribution (right scale, red dots) for 26 surveyed districts]

Следует отметить, что полученное в данной работе значение медианы ОА радона в Челябинской области в целом (98 Бк/м³), основанное на результатах интегральных измерений, примерно в два раза превышает опубликованное ранее значение (51 Бк/м³), основанное на результатах преимущественно инспекционных (экспрессных) измерений, содержащихся в ФБДОПИ [16], на долю которых приходится 99,94% результатов (из них 50,31% – результаты экспрессных измерений ОА радона, 49,63% –

¹² Санитарно-эпидемиологические требования к условиям и организации обучения в общеобразовательных учреждениях: санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.4.2.2821-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 29.12.2010 г. № 189. [Sanitary and epidemiological requirements for the learning environment and organization of education in the general education institutions. Sanitary and epidemiological rules and norms SanPiN 2.4.2.2821-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 29.12.2010 No. 189. (In Russ.)]

лять от 12 до 15 ч в сутки плюс выходные и праздничные дни. Результаты длительных интегральных измерений в таких условиях неизбежно повышают среднее значение ОА радона и тем выше, чем больше доля измерений в таких зданиях. Данный факт, однако, относится к рассмотрению результатов обследований с гигиенической точки зрения. С точки зрения оценки связи потенциальной радоноопасности территории с формирующейся в зданиях радоновой обстановкой, результаты интегральных измерений являются более объективными, т.к. исключают ряд влияющих факторов, наиболее значимым из которых как раз является поведенческий.

По итогам проведенного обследования протоколы измерений и аналитические материалы были направлены в Центр гигиены и эпидемиологии в Челябинской области. К сожалению, организаторы не располагают информацией о каких-либо радонозащитных мероприятиях, осуществленных или запланированных к проведению в зданиях, где были выявлены наиболее высокие уровни ОА радона. Данный факт заставляет в очередной раз обратить внимание на необходимость разработки национальной радоновой программы, стратегии или плана действий по радону в соответствии с современными рекомендациями МАГАТЭ [27–31]. В программе должна быть не только обозначена необходимость проведения радоновых обследований 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» с целью «совершенствования 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», о чем говорится в Указе 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», но и должны быть определены зоны ответственности различных организаций и ведомств, участвующих в решении «радоновой проблемы», а также, что наиболее важно, указаны источники финансирования корректирующих и защитных мероприятий, которые должны при необходимости осуществляться по итогам проведенных радоновых обследований. В противном случае результаты подобных обследований будут продолжать представлять преимущественно теоретическую научную значимость для изучения закономерностей и связей, отработки статистического инструментария и т.д., а конкретные результаты радонозащитных мероприятий (например, [32, 33]) все так же будут являться скорее уникальным событием, нежели общепринятой

практикой, направленной на снижение уровней внутреннего облучения населения за счет радона, дающего основной вклад в среднегодовую индивидуальную эффективную дозу, и, в конечном итоге, на снижение количества радон-индуцированных случаев рака легкого среди населения Российской Федерации.

Связь ОА радона в воздухе помещений с комплексом предикторов потенциальной радоноопасности

В рамках проекта «Европейский атлас природной радиоактивности» (European Atlas of Natural Radiation [34]), в который входит уже упомянутая карта радона в помещениях, идет создание карты, отображающей такой синтетический показатель, как геогенный радоновый потенциал [11], который формируется на основе целого ряда количественных и качественных показателей, так или иначе связанных с радоном и характеризующих потенциальную радоноопасность территории, обусловленную исключительно геологическими факторами [2] (например, удельная активность ^{238}U в грунте и подстилающих породах, проницаемость грунта, ОА радона в грунтовом и атмосферном воздухе, наличие трещин и разломов [35]). В России имеется опыт создания таких карт, например, для Уральского региона они были составлены в 1993–1995 гг. государственным геологоразведочным предприятием «Зеленогорскгеология» [36, 37]. На этих картах выделен ряд так называемых эколого-радиогеохимических зон, предположительно обладающих по совокупности предикторов повышенным геогенным радоновым потенциалом. На рисунке 4 представлена подобная карта Челябинской области (подготовлена д.г.-м.н. проф. РАН П.С. Микляевым, названия зон даны в соответствии с [36, 37]).

Эколого-радиогеохимические зоны пересекают Челябинскую область в меридиональном направлении, при этом территории районов и городских округов могут относиться как к одной, так и сразу к нескольким зонам, или не относиться к ним вообще. Возникает закономерный вопрос: можно ли на основании лишь того факта, что населенные пункты относятся к одной из таких зон, говорить о том, что в среднем в таких населенных пунктах ОА радона в воздухе помещений будет выше, чем в населенных пунктах, не относящихся к какой-либо из зон? Т.е., иными словами, можно ли использовать эту карту в качестве прогнозной?

Чтобы это выяснить, были сформированы 5 массивов, содержащих результаты измерений ОА радона в воздухе помещений подвального, цокольного и первого этажей (по аналогии с Европейской картой радона в помещениях [12]) в зданиях, расположенных в населенных пунктах, относящихся, согласно карте на рисунке 4, к зонам I, II, IIIa, V и ни к одной из зон (условно «Зона 0»). Для зоны IV объем массива составил всего 1 значение, поэтому анализ не

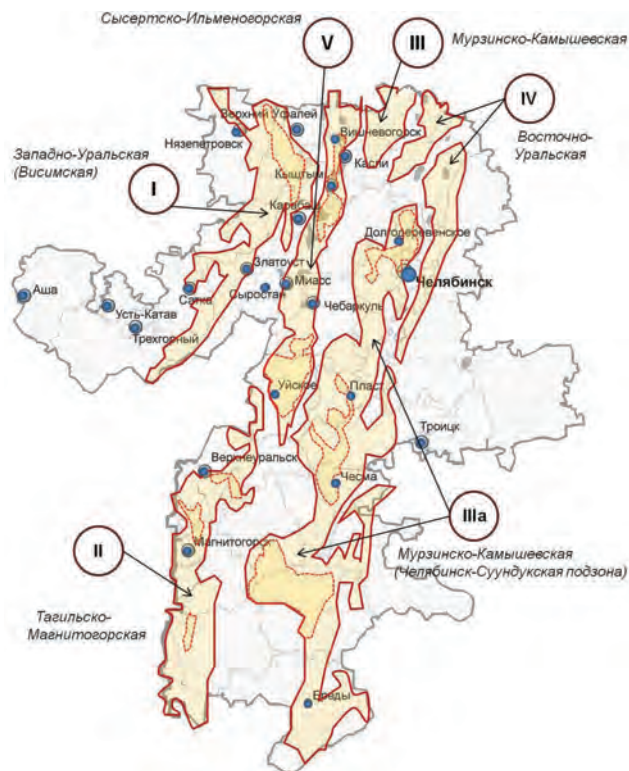


Рис. 4. Карта эколого-радиогеохимического зонирования территории Челябинской области

[Fig. 4. Map of ecological and radiogeochemical zones in Chelyabinsk Oblast: I – Western Ural (Visim); II – Tagil-Magnitogorsk; III – Murzinka-Kamyshevsk; IIIa – Chelyabinsk-Suunduk subzone; IV – Eastern Ural; V – Sysert-Ilmenogorsk]

проводился. Результаты расчета характеристик полученных массивов приведены в таблице 6.

Чтобы определить, существуют ли статистически достоверные различия между значениями медиан полученных логнормальных распределений, был проведен дисперсионный анализ с использованием теста Краскела

– Уоллиса и поправкой Бонферрони на множественное сравнение. Получено, что различия между медианой в зоне II и медианами в остальных зонах, а также между медианой в зоне I и в зонах IIIa и V, являются статистически достоверными с доверительной вероятностью 95%.

Таким образом, установлено, что медианные значения ОА радона в помещениях зданий, расположенных на территории трех из четырех эколого-радиогеохимических зон, достоверно не отличаются от медианного значения ОА радона в помещениях зданий, расположенных за пределами таких зон. Более того, в помещениях зданий, расположенных на территории зоны II, медианное значение ОА радона более чем в 2 раза ниже остальных. Полученные результаты приводят к выводу, что возможность использования карты эколого-радиогеохимического зонирования территории Челябинской области в качестве карты потенциальной радоноопасности представляется весьма сомнительной.

Заключение

Представленные в статье результаты масштабного и продолжительного радонового обследования на территории Челябинской области подробно раскрывают лишь одну сторону радоновой ситуации – территориальную вариабельность значений ОА радона в воздухе помещений зданий. Между тем обширный набор дополнительных характеристик каждой точки измерений, содержащийся в БД «Радон», позволяет проанализировать и ряд других аспектов, связанных с изменчивостью ОА радона, например, сезонную и поэтажную вариабельность. Однако исследование указанных аспектов не входило в задачи данной конкретной работы и будет проведено отдельно.

Повысить достоверность оценки среднегодового значения ЭРОА изотопов радона, являющегося в настоящее время нормируемой величиной согласно НРБ-99/2009 и ОСПОРБ 99/2010, по результатам измерений ограниченной длительности могло бы помочь использование региональных сезонных (месячных) корректирующих коэффициентов. Для их вычисления, однако, необходим

Таблица 6

Характеристики массивов данных об ОА радона в воздухе помещений на территории эколого-радиогеохимических зон

[Table 6]

Indoor radon concentrations on the territory of ecological and radiogeochemical zones: parameters of the datasets

Массив [Dataset]	N	GM(CI95)	GSD	X_{90}	X_{95}	AM
Зона 0 [Zone 0 – outside of zones]	293	110 (100–121)	2,3	319	431	159
Зона I [Zone I]	309	99 (91–107)	2,1	259	340	134
Зона II [Zone II]	56	54 (46–64)	1,8	119	149	66
Зона IIIa [Zone IIIa]	801	123 (115–130)	2,5	388	538	190
Зона V [Zone V]	807	130 (122–140)	2,7	468	673	223

Обозначения в табл. 6: N – количество значений в массиве после устранения ВЭЗ; GM(CI95) – медиана распределения значений ОА радона (в скобках – 95% доверительный интервал), Бк/м³; GSD – геометрическое стандартное отклонение; X_{90} – 0,90-квантиль распределения, Бк/м³; X_{95} – 0,95-квантиль распределения, Бк/м³; AM – среднее арифметическое значение ОА радона, Бк/м³.

[Designations in table 6: N – number of measurements after discarding outliers (extremely high values); GM(CI95) – median (with 95% confidence interval), Bq/m³; GSD – geometric standard deviation; X_{90} – 90th percentile, Bq/m³; X_{95} – 95th percentile, Bq/m³; AM – arithmetic mean, Bq/m³.]

не только значительный по объему массив результатов интегральных измерений ОА радона длительностью 80–100 суток в одних и тех же помещениях, но и результаты определения фоновых значений ОА радона в наружном воздухе [38]. Массив данных по Челябинской области, содержащийся в БД «Радон», в будущем вполне может стать основой для подобных расчетов.

Авторы выражают глубокую признательность Андрееву Н.М. (ООО «РЭЛ МГРТ», г. Челябинск), к.э.н. Маренному М.А. (ООО «ГК РЭИ», г. Москва) и к.ф.-м.н. Нефедову Н.А. (ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России, г. Москва) за участие в организации и проведении многолетнего радонового обследования в Челябинской области.

Литература

1. Киселев С.М., Жуковский М.В., Стамат И.П., Ярошенко И.В. Радон: От фундаментальных исследований к практике регулирования. М.: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2016. 432 с.
2. Маренный А.М., Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б. Закономерности формирования радонового поля в геологической среде. М.: Перо, 2016. 394 с.
3. Микляев П.С. Что делать? Или «радоновый» кризис в радиационных изысканиях // АНРИ. 2005. № 3. С. 60–64.
4. Павлов И.В., Гулябязц Л.А., Маренный А.М., Охрименко С.Е. Задачи и методы радиационного контроля при строительстве зданий // АНРИ. 2003. № 3. С. 2–12.
5. Микляев П.С., Петрова Т.Б., Охрименко С.Е. Новые аспекты оценки радоноопасности территорий городской застройки // АНРИ. 2003. № 4. С. 63–71.
6. Маренный А.М., Охрименко С.Е., Павлов И.В. Задачи и методы оценки потенциальной радоноопасности селитебных территорий // АНРИ. 2006. № 2. С. 25–30.
7. Микляев П.С., Петрова Т.Б. Механизмы формирования потока радона с поверхности почв и подходы к оценке радоноопасности селитебных территорий // АНРИ. 2007. № 2. С. 2–16.
8. Маренный А.М. Радон в инженерно-экологических изысканиях для строительства // АНРИ. 2008. № 2. С. 21–28.
9. Dubois G., Bossew P., Tollefsen T., De Cort M. First steps towards a European atlas of natural radiation: status of the European indoor radon map // J. Environ. Radioact. 2010. Vol. 101, No 10. P. 786–798.
10. Tollefsen T., Cinelli G., Bossew P., et al. From the European Indoor Radon Map Towards an Atlas of Natural Radiation // Radiat. Prot. Dosimetry. 2014. Vol. 162, No 1-2. P. 129–134.
11. Микляев П.С., Петрова Т.Б., Маренный А.М. Европейский атлас природной радиации – современное состояние, проблемы, перспективы // АНРИ. 2019. № 2 (97). С. 27–42.
12. European Indoor Radon Map: <https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Atlas-of-Natural-Radiation/Digital-Atlas/Indoor-radon-AM/Indoor-radon-concentration> (дата обращения: 20.07.2020).
13. Романович И.К., Стамат И.П., Кормановская Т.А., Кононенко Д.В. Природные источники ионизирующего излучения: дозы облучения, радиационные риски, профилактические мероприятия / под ред. акад. РАН Г.Г. Онищенко и проф. А.Ю. Поповой. СПб.: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2018. 432 с.
14. Максимовский В.А., Харламов М.Г., Мальцев А.В., Лучин И.А., Смыслов А.А. Районирование территории России по степени радоноопасности // АНРИ. 1996/97. № 3 (9). С. 66–73.
15. Маренный А.М., Андреев Н.М., Астафуров В.И., и др. Интегральные измерения средней объемной активности радона в помещениях населенных пунктов Челябинской области // Сб. тез. науч.-практ. конф. с междунар. уч. «Актуальные вопросы радиационной гигиены», Санкт-Петербург, 7-9 июня 2010 г. СПб., 2010. С. 98–99.
16. Кононенко Д.В. Анализ распределений значений объемной активности радона в воздухе помещений в субъектах Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 1. С. 85–103.
17. Daraktchieva Z., Miles J.C., McColl N. Radon, the lognormal distribution and deviation from it // J. Radiol. Prot. 2014. Vol. 34, No 1. P. 183–190.
18. Murphy P., Organo C. A comparative study of lognormal, gamma and beta modelling in radon mapping with recommendations regarding bias, sample sizes and the treatment of outliers // J. Radiol. Prot. 2008. Vol. 28, No 3. P. 293–302.
19. Jimenez R., Hidalgo M., Klimek P. Supplementary Materials for Testing for voter rigging in small polling stations // Sci. Adv. 2017. No 3. P. e1602363: <https://advances.sciencemag.org/content/suppl/2017/06/26/3.6.e1602363.DC1> (дата обращения: 20.07.2020)
20. Cimbala J.M. Outliers: <https://www.me.psu.edu/cimbala/me345/Lectures/Outliers.pdf> (дата обращения: 20.07.2020)
21. An American National Standard. Test Uncertainty. ASME PTC 19.1-2005 (Revision of ASME PTC 19.1-1998). New York: The American Society of Mechanical Engineers; 2006. 92 p.
22. Hoaglin D.C., Iglewicz B. Fine-Tuning Some Resistant Rules for Outlier Labeling // J. Am. Stat. Assoc. 1987. Vol. 82, No 400. P. 1147–1149.
23. Tukey J.W. Exploratory Data Analysis. Addison-Wesley Pub. Co.; 1977. 688 p.
24. Hoaglin D.C., Iglewicz B., Tukey J.W. Performance of Some Resistant Rules for Outlier Labeling // J. Am. Stat. Assoc. 1986. Vol. 81, No 396. P. 991–999.
25. McLaughlin M.P. Compendium of Common Probability Distributions. Second Edition, v2.7. 2016. 128 p.: https://www.causascientia.org/math_stat/Dists/Compendium.pdf (дата обращения: 20.07.2020)
26. Романович И.К., Стамат И.П., Кормановская Т.А., и др. Результаты выборочного исследования содержания радона в помещениях детских дошкольных и школьных организаций Ленинградской области // Здоровье населения и среда обитания. 2017. № 10 (295). С. 46–49.
27. Киселев С.М., Жуковский М.В. Современные подходы к обеспечению защиты населения от радона. Международный опыт регулирования // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 4. С. 48–52.
28. Киселев С.М. Эволюция подходов МКРЗ к регулированию защиты населения от радона // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2016. Т. 61, № 2. С. 70–74.
29. Киселев С.М. Формирование современной методологии регулирования защиты населения от облучения радоном // Гигиена и санитария. 2017. Т. 96, № 1. С. 52–56.
30. Киселев С.М., Стамат И.П., Маренный А.М., Ильин Л.А. Обеспечение защиты населения от облучения радоном. Проблемы и пути решения // Гигиена и санитария. 2018. Т. 97, № 2. С. 101–110.
31. Киселев С.М., Маренный А.М., Романов В.В. Радон. Современные подходы к регулированию радиационной безопасности населения // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2. С. 94–102.
32. Световидов А.В., Венков В.А., Стамат И.П., Горский Г.А. Защита зданий от радона: первые опыты по разработке и осуществлению защитных мероприятий // Матер. науч.-практ. конф. «Современные проблемы обеспечения радиационной безопасности населения». СПб., 2006. С. 41–44.
33. Световидов А.В., Венков В.А., Горский Г.А. Опыт проведения радонозащитных мероприятий в эксплуатируемых зданиях // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 4. С. 35–39.

34. European Atlas of Natural Radiation: <https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Atlas-of-Natural-Radiation/Digital-Atlas> (дата обращения: 20.07.2020)
35. European Geogenic Radon Map: <https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Atlas-of-Natural-Radiation/Digital-Atlas/Geogenic-radon/Geogenic-radon> (дата обращения: 20.07.2020)
36. Жуковский М.В., Ярмошенко И.В. Радон: измерение, дозы, оценка риска. Екатеринбург: УрО РАН, Институт промышленной экологии, 1997. 231 с.
37. Уткин В.И., Чеботина М.Я., Евстигнеев А.В., и др. Радиоактивные беды Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 93 с.
38. Burke O., Long S., Murphy P., et al. Estimation of seasonal correction factors through Fourier decomposition analysis – a new model for indoor radon levels in Irish homes // J. Radiol. Prot. 2010. Vol. 3. No 3, P. 433–443.

Поступила: 15.06.2020 г.

Маренный Альберт Михайлович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией природных источников ионизирующих излучений Научно-технического центра радиационно-химической безопасности и гигиены Федерального медико-биологического агентства, Москва, Россия

Кононенко Дмитрий Викторович – научный сотрудник лаборатории дозиметрии природных источников Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: d.kononenko@niirg.ru

Труфанова Асима Ербулатовна – младший научный сотрудник лаборатории природных источников ионизирующих излучений Научно-технического центра радиационно-химической безопасности и гигиены Федерального медико-биологического агентства, Москва, Россия

Для цитирования: Маренный А.М., Кононенко Д.В., Труфанова А.Е. Радоновое обследование в Челябинской области в 2008–2011 гг. Анализ территориальной вариативности объемной активности радона // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 51–67. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-51-67

Radon survey in Chelyabinsk Oblast, Russia, in 2008–2011. Analysis of spatial variability of indoor radon concentration

Albert M. Marennyy¹, Dmitry V. Kononenko², Asima E. Trufanova¹

¹ Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene, Federal Medical-Biological Agency, Moscow, Russia

² 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

An extensive radon survey was conducted in 2008–2011 in the framework of the Federal target program on the territory of 29 districts of Chelyabinsk Oblast. SSNTDs were used to measure indoor radon concentrations in public buildings, dwellings and industrial buildings. The results are stored in the database “Radon” owned by Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene of Federal Medical-Biological Agency. The paper presents the results of the analysis of spatial variability of indoor radon concentration and the relationship of this value with a set of geological predictors of radon potential of the territory integrated into a map of ecological and radiogeochemical zones. The results show that in all districts and the whole Chelyabinsk Oblast radon concentrations conform to a lognormal distribution, but in ten districts log-logistic distribution fits the data slightly better. Nevertheless, relative difference between the median values of indoor radon concentration calculated from the two fitted distributions yields zero. The results show that dose assessment based on the arithmetic means could lead to an overestimation of the doses from radon in 1.4 times on average compared to that based on the medians. The median value does not exceed 400 Bq/m³ in any of the surveyed territories and the 95th percentile lies between 96 and 1274 Bq/m³. The fraction of indoor radon concentrations above 400 Bq/m³ expected from the fitted distribution lies between less than 0.1 and 26.8%. The highest values of this fraction were obtained for the Sosnovsky, Kaslinsky, Bredinsky districts and the Miassky urban district (except for the city of Miass). A map of ecological and radiogeochemical zones in Chelyabinsk Oblast was released in 1993–1995 and it was based on a set of geological predictors of radon potential of the territory. We analyzed the relationship of these zones with the results of the radon survey. One-way ANOVA on ranks with the Bonferroni correction showed that there is no statistically significant difference at the 95% confidence level amongst the medians of indoor radon concentration on basement, ground and first floors in

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

settlements, which are located on the territory of three of four of these zones and outside of the territory of all zones. In the fourth zone the median was even two times lower than outside of the zones. These results lead to the conclusion that the possibility of using this map as a map of radon-prone areas is very doubtful. Each datapoint stored in the “Radon” database has a number of additional properties, which allows analyzing other types of indoor radon concentration variability such as seasonal or floor-to-floor. It is expected that later this dataset could be used for estimating regional seasonal correction factors.

Key words: radon, concentration, radon survey, SSNTD, data analysis, lognormal distribution, geogenic radon potential, ecological and radiogeochemical zone, Chelyabinsk Oblast.

References

- Kiselev SM, Zhukovsky MV, Stamat IP, Yarmoshenko IV. Radon: From fundamental research to regulatory practice. Moscow: Russian State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical-Biological Agency; 2016: 432. (In Russian)
- Marennyy AM, Tsapalov AA, Miklyaev PS, Petrova TB. Regularities of radon field formation in the geological environment. Moscow: Pero; 2016: 394. (In Russian)
- Miklyaev PS. What to do? Or the “radon” crisis in radiation research. *ANRI = ANRI*. 2005;3: 60–4. (In Russian)
- Pavlov IV, Gulabyants LA, Marennyy AM, Okhrimenko SE. Tasks and methods of radiation control while constructing the buildings. *ANRI = ANRI*. 2003;3: 2–12. (In Russian)
- Miklyaev PS, Petrova TB, Okhrimenko SE. New aspects of assessing the radon potential of urban areas. *ANRI = ANRI*. 2003;4: 63–71. (In Russian)
- Marennyy AM, Okhrimenko SE, Pavlov IV. Tasks and methods for assessing the radon potential of residential areas. *ANRI = ANRI*. 2006;2: 25–30. (In Russian)
- Miklyaev PS, Petrova TB. Mechanisms of radon flow formation from the soil surface and approaches to the assessment of the radon potential of residential areas. *ANRI = ANRI*. 2007;2: 2–16. (In Russian)
- Marennyy AM. Radon in engineering and environmental research for construction. *ANRI = ANRI*. 2008;2: 21–8. (In Russian)
- Dubois G, Bossew P, Tollefsen T, De Cort M. First steps towards a European atlas of natural radiation: status of the European indoor radon map. *J. Environ. Radioact.* 2010;101(10): 786–98.
- Tollefsen T, Cinelli G, Bossew P, Gruber V, De Cort M. From the European Indoor Radon Map Towards an Atlas of Natural Radiation. *Radiat. Prot. Dosimetry*. 2014;162(1-2): 129–34.
- Miklyaev PS, Petrova TB, Marennyy AM. European Atlas of Natural Radiation – the Current Status, Problems, Prospects. *ANRI = ANRI*. 2019;2(97): 27–42. (In Russian)
- European Indoor Radon Map. – Available from: <https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Atlas-of-Natural-Radiation/Digital-Atlas/Indoor-radon-AM/Indoor-radon-concentration> (Accessed: 20 July 2020)
- Romanovich IK, Stamat IP, Kormanovskaya TA, Kononenko DV. Natural sources of ionizing radiation: radiation doses, radiation risks, preventive measures. Saint-Petersburg: FBUN NIIRG im. P.V. Ramzaeva; 2018: 432. (In Russian)
- Maksimovskiy VA, Kharlamov MG, Maltsev AV, Luchin IA, Smyslov AA. Zoning of the territory of Russia according to the radon potential. *ANRI = ANRI*. 1996/97;3(9): 66–73. (In Russian)
- Marennyy AM, Andreev NM, Astafurov VI, Gubin AT, Dmitriev VA, Marennyy MA, et al. Long-term measurements of indoor radon concentration in the settlements of Chelyabinsk Oblast, Russia. In: Scientific and practical conference with international participation “Current issues of radiation hygiene”; 2010 Jun 7-9; Saint-Petersburg; 2010: 98–9. (In Russian)
- Kononenko DV. 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)
- Daraktchieva Z, Miles JC, McColl N. Radon, the lognormal distribution and deviation from it. *J. Radiol. Prot.* 2014;34(1): 183–90.
- Murphy P, Organo C. A comparative study of lognormal, gamma and beta modelling in radon mapping with recommendations regarding bias, sample sizes and the treatment of outliers. *J. Radiol. Prot.* 2008;28(3): 293–302.
- Jimenez R, Hidalgo M, Klimek P. Supplementary Materials for Testing for voter rigging in small polling stations. *Sci. Adv.* 2017;3: e1602363. – Available from: <https://advances.sciencemag.org/content/suppl/2017/06/26/3.6.e1602363.DC1> (Accessed: 20 July 2020)
- Cimbala JM. Outliers. – Available from: <https://www.me.psu.edu/cimbala/me345/Lectures/Outliers.pdf> (Accessed: 20 July 2020)
- An American National Standard. Test Uncertainty. ASME PTC 19.1-2005 (Revision of ASME PTC 19.1-1998). New York: The American Society of Mechanical Engineers; 2006: 92.
- Hoaglin DC, Iglewicz B. Fine-Tuning Some Resistant Rules for Outlier Labeling. *J. Am. Stat. Assoc.* 1987;82(400): 1147–9.
- Tukey JW. Exploratory Data Analysis. Addison-Wesley Pub. Co.; 1977: 688.
- Hoaglin DC, Iglewicz B, Tukey JW. Performance of Some Resistant Rules for Outlier Labeling. *J. Am. Stat. Assoc.* 1986;81(396): 991–9.
- McLaughlin MP. Compendium of Common Probability Distributions. 2016; Second Edition, 2.7: 128. – Available from: https://www.causascientia.org/math_stat/Dists/Compendium.pdf (Accessed: 20 July 2020)
- Romanovich IK, Stamat IP, Kormanovskaya TA, Balabina TA, Koroleva NA, Istorik OA, et al. Results of sampling analysis of radon content in preschool and school organizations in the Leningrad region. *Zdorovie naseleniya i sreda obitaniya = Public Health and Life Environment*. 2017;10(295): 46–9. (In Russian)
- Kiselev SM, Zhukovsky MV. Modern approaches to public protection against indoor radon. International regulatory experience. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(4): 52–5.
- Kiselev SM. Evolution of Approaches of ICRP to the Regulations of Protection of the Population from Radon. *Meditinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost' = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2016;61(2): 70–4. (In Russian)
- Kiselev SM. Formation of modern methodology of the regulation of protection population from radiation with radon. *Gigiena i Sanitaria = Hygiene and Sanitation*. 2017;96(1): 52–6. (In Russian)
- Kiselev SM, Stamat IP, Marennyy AM, Ilyin LA. Provision of the public radiological protection against radon exposure. Challenges and resolutions. *Gigiena i Sanitaria = Hygiene and Sanitation*. 2018;97(2): 101–10. (In Russian)
- Kiselev SM, Marennyy AM, Romanov VV. Radon. Advanced regulatory approaches to public radiation protection. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2): 94–102. (In Russian)

32. Svetovidov AV, Venkov VA, Stamat IP, Gorsky GA. Protection of buildings from radon: first experiments on the development and implementation of protective measures. In: Scientific and practical conference "Modern problems of radiation safety of the population". St. Petersburg; 2006: 41–4. (In Russian)
33. Svetovidov AV, Venkov VA, Gorsky GA. Experience in radon mitigation in the operating buildings. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(4): 35–9. (In Russian)
34. European Atlas of Natural Radiation: <https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Atlas-of-Natural-Radiation/Digital-Atlas> (Accessed: 20 July 2020)
35. European Geogenic Radon Map: <https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Atlas-of-Natural-Radiation/Digital-Atlas/Geogenic-radon/Geogenic-radon> Accessed: 20 July 2020)
36. Zhukovsky MV, Yarmoshenko IV. Radon: measurements, doses, risk assessment. Ekaterinburg: UB RAS, Institute of Industrial Ecology; 1997: 231. (In Russian)
37. Utkin VI, Chebotina MYa, Evstigneev AV, Ekidin AA, Rybakov EN, Trapeznikov AV, et al. Radioactive troubles of the Urals. Ekaterinburg: UB RAS; 2000: 93. (In Russian)
38. Burke O, Long S, Murphy P, Organo C, Fenton D, Colgan PA. Estimation of seasonal correction factors through Fourier decomposition analysis – a new model for indoor radon levels in Irish homes. *J Radiol Prot*. 2010 Sep;30(3): 433–43.

Received: June 15, 2020

Albert M. Marennyy – PhD, Head of Laboratory of Natural Sources of Ionizing Radiation, Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene, Federal Medical-Biological Agency, Moscow, Russia. ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6142-0234>

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, Russia. E-mail: d.kononenko@niirg.ru) ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1392-1226>

Asima E. Trufanova – Junior researcher, Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene, Federal Medical-Biological Agency, Moscow, Russia.

For citation: Marennyy A.M., Kononenko D.V., Trufanova A.E. Radon survey in Chelyabinsk Oblast, Russia, in 2008–2011. Analysis of spatial variability of indoor radon concentration. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No. 3. P. 51–67. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-51-67

Новые методические приемы оценки прогнозируемых доз внутреннего облучения населения Брянской области в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС

В.А. Яковлев, Г.Я. Брук

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

Статья посвящена изучению закономерностей формирования доз внутреннего облучения взрослого населения Брянской области за счет потребления основных дозообразующих пищевых продуктов в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС и методическим особенностям оценки прогнозируемых доз внутреннего облучения. Предложен новый методический подход к расчету прогнозируемых доз внутреннего облучения населения, базирующийся на одноэкспоненциальной модели изменения дозы с периодом ее полууменьшения, зависящим от времени. Полученные результаты позволили уточнить прогнозируемые дозы внутреннего облучения населения Брянской области на период до 2056 г. Аналогичный подход (одноэкспоненциальная модель) применен и в отношении внешнего облучения. Это позволило рассчитать прогнозируемые дозы суммарного (внешнее + внутреннее) облучения населения. В качестве примера в статье приведено распределение всех населенных пунктов Брянской области, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения, по величине прогнозируемой средней годовой эффективной дозы облучения населения и его критических (наиболее облучаемых) групп в разные периоды времени после аварии.

Ключевые слова: Чернобыльская авария, население, радиоактивное загрязнение, цезий-137, цезий-134, доза облучения, прогнозируемая доза.

Введение

К зонам радиоактивного загрязнения вследствие аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) в Брянской области относятся 749 населенных пунктов¹ (НП). Значительно пострадали также Тульская, Калужская и Орловская области. Кроме этих 4 областей, еще в 10 субъектах Российской Федерации имеются населенные пункты, расположенные в зонах радиоактивного загрязнения.

Вопросам исследования закономерностей формирования и прогноза доз облучения населения в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС был посвящен целый ряд публикаций [1–12].

Цель исследования – совершенствование методических приемов оценки прогнозируемых доз внутреннего облучения населения Брянской области в отдаленный

период после аварии на Чернобыльской АЭС и уточнение прогноза доз внутреннего облучения населения на период до 2056 г.

Задачи исследования

- анализ результатов измерений содержания ¹³⁷Cs в организме жителей Брянской области в 1987–2016 гг.;
- разработка новых методических приемов расчета прогнозируемых доз внутреннего облучения населения, базирующихся на одноэкспоненциальной модели изменения дозы с периодом ее полууменьшения, зависящим от времени;
- подготовка уточненного прогноза доз облучения населения, проживающего на радиоактивно загрязненных вследствие аварии на Чернобыльской АЭС территориях Брянской области, на период до 2056 г.

¹ Постановление Правительства РФ от 08.10.2015 № 1074 «Об утверждении перечня населенных пунктов, находящихся в границах зон радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС». [Decree of the Government of the Russian Federation № 1074, 08.10.2015 «On the establishment of the list of residential places within the boundaries of the zones, radioactively contaminated due to the Chernobyl NPP accident» (In Russ.)]

Яковлев Вячеслав Арсентьевич

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: yava1952@gmail.com.

Материалы и методы

Материалы и методы проведенных исследований подробно описаны в работе [10].

Методические указания МУ 2.6.1.2222-07 определяют требования к необходимым исходным данным и процедуру расчета прогнозируемых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие выброса в окружающую среду радионуклидов цезия и стронция (^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{90}Sr).

В соответствии с этими методическими указаниями (МУ), основными параметрами, определяющими порядок расчета прогнозируемых доз внутреннего облучения в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС, являются «медленные» эффективные периоды полураспада основных дозообразующих пищевых продуктов (молока и грибов) от ^{137}Cs за счет радиоактивного распада последнего и природного самоочищения данных продуктов со временем от этого химического элемента и эффективное годовое потребление молока и грибов лесных (дозовые эквиваленты потребления сельскохозяйственных и природных пищевых продуктов) взрослыми жителями европейской части России.

Как правило, для описания изменений во времени экспериментальных данных, усредненных по годам, используют двухэкспоненциальную модель вида:

$$\text{КП}(t) \text{ или } e_{\text{int}137}(t) = d \times \exp(-0,693 \times (t - t_0) / T_1) + f \times \exp(-0,693 \times (t - t_0) / T_2), \quad (1)$$

где: t – календарный год;

t_0 – начало радиоактивных выпадений;

$\text{КП}(t)$ – коэффициент перехода ^{137}Cs из почвы в пищевой продукт;

$e_{\text{int}137}(t)$ – средняя годовая эффективная доза внутреннего облучения населения цезием-137, нормированная на плотность загрязнения почвы цезием-137;

d и f – коэффициенты, имеющие ту же размерность, что и $\text{КП}(t)$ или $e_{\text{int}137}(t)$.

В этой модели T_1 – это средний период полураспада в интервале от момента аварии до момента, пока первое слагаемое уравнения (1) много больше второго, а T_2 – средний период полураспада в интервале от момента, когда второе слагаемое уравнения (1) ста-

нет много больше первого, и до конца наблюдаемого интервала.

Из уравнения (1) нельзя получить достоверные периоды полураспада изучаемых величин в наблюдаемом интервале времени (иногда достаточно коротком) и тем более за его пределами. Получаемые из уравнения (1) величины периодов полураспада всегда находятся в интервале времени от T_1 до T_2 .

Результаты и обсуждение

Предлагается другая (одноэкспоненциальная) модель описания изучаемых величин с периодом полураспада, зависящим от времени, которая выглядит следующим образом:

$$\text{КП}(t) \text{ или } e_{\text{int}137}(t) = a \times \exp(-0,693 \times (t - t_0) / T(t_0; t - t_0)), \quad (2)$$

$$\text{где } T(t_0; t - t_0) = b \cdot (t - t_0) + c.$$

В 1986–2016 гг. Институтом радиационной гигиены на территории Брянской области в 6 наиболее загрязненных районах было проведено более 100 тысяч измерений местных жителей на счетчиках (спектрометрах) излучения человека (СИЧ) и рассчитаны для них средние годовые эффективные дозы внутреннего облучения от смеси радионуклидов цезия (^{134}Cs и ^{137}Cs). Из этого массива данных были отобраны результаты измерений содержания ^{137}Cs и ^{134}Cs в организме взрослых жителей, проживающих с 1987 г. в сельских НП с плотностью загрязнения почвы ^{137}Cs в 1986 г. от 5 до 30 Ки/км² (где фактически не применялись контрмеры). Общее количество использованных в настоящей работе данных СИЧ-измерений, выполненных институтом в 170 населенных пунктах в период 1987–2016 гг., составляет 14 663. Для них были рассчитаны средние годовые эффективные дозы внутреннего облучения $e_{\text{int}}(t)$ от $^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$, нормированные на плотность загрязнения почвы ^{137}Cs в соответствующий год. По этим данным были получены коэффициенты уравнения регрессии (2), которые приведены в таблице 1.

Обработку всех собранных данных по СИЧ-измерениям проводили с использованием программы статистической обработки данных IBM SPSS Statistics.

Фактические результаты определения $e_{\text{int}(134+137)}(t)$ и соответствующий им график уравнения регрессии приведены на рисунке 1.

Таблица 1

Численные значения параметров уравнения (2)

[Table 1]

Numerical data for the parameters of equation 2]

Изучаемая величина [Parameter]	a, мЗв×м ² ×МБк ⁻¹ [a, mSv×m ² ×MBq ⁻¹]	b, отн. ед. [b, rel. units]	c, лет [c, years]	R ²
$e_{\text{int}(134+137)}$, мЗв×м ² ×МБк ⁻¹ [$e_{\text{int}(134+137)}$, mSv×m ² ×MBq ⁻¹]	91±31	0,108±0,004	0,25±0,06	0,99

R² – коэффициент детерминации.

[R² – coefficient of determination].

² Методические указания МУ 2.6.1.2222-07 «Прогноз доз облучения населения радионуклидами цезия и стронция при их попадании в окружающую среду». Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, 2007. [Methodical guidelines MU 2.6.1.2222-07 «Prognosis of the doses to the public from the radionuclides of caesium and strontium due to their fallout into the environment», Federal service for surveillance on consumer rights protection and human well-being, Moscow, 2007 (In Russ.)]

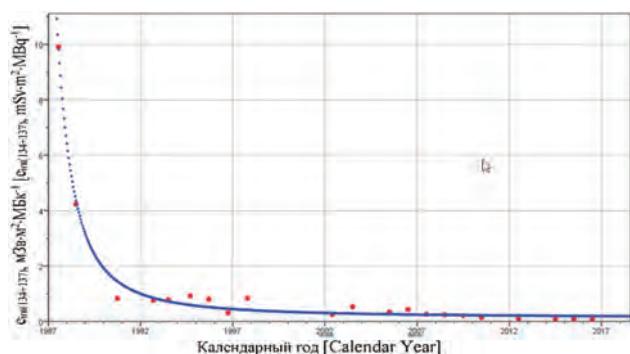


Рис. 1. Динамика средних годовых эффективных доз внутреннего облучения ($e_{\text{int}(134+137)}$) взрослого сельского населения Брянской области за период 1987–2016 гг., нормированных на плотность загрязнения почвы ^{137}Cs в соответствующий год

[Fig. 1. Trends in the average annual effective doses from internal exposure ($e_{\text{int}(134+137)}$) of the adult rural public in the Bryansk region in 1987–2016, normalized to the ^{137}Cs contamination density in the corresponding year]

Суммарную среднюю годовую эффективную дозу внутреннего облучения радионуклидами цезия взрослого сельского населения Брянской области в год t рассчитывают по формуле:

$$e_{\text{int}(137+134)}(t) = k^{137} \times A^{137}(t) + k^{134} \times A^{134}(t) = e_{\text{int}137}(t) \times (1 + k^{134} \times A^{134}(t) / (k^{137} \times A^{137}(t))), \quad (3)$$

где: k^{137} и k^{134} – дозовые коэффициенты для ^{137}Cs и ^{134}Cs соответственно, мЗв·кг/Бк;

$A^{137}(t)$ и $A^{134}(t)$ – удельная активность ^{137}Cs и ^{134}Cs в теле измеряемых жителей для года t , Бк/кг.

В МУ 2.6.1.579-96 «Реконструкция средней накопленной в 1986–1995 гг. эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году» приводятся значения дозовых коэффициентов $k^{137} = 2,3 \times 10^{-3}$ мЗв·кг/Бк и $k^{134} = 3,36 \times 10^{-3}$ мЗв·кг/Бк. На начало радиоактивных выпадений соотношение $A^{134}(t_0)/A^{137}(t_0) = 0,54$. Со временем оно будет изменяться по следующему закону:

$$A^{134}(t)/A^{137}(t) = 0,54 \times \exp(-0,693 \times (t - t_0) \times (1/T_{134} - 1/T_{137})), \quad (4)$$

где: t – календарный год, $t_0 = 1986,33$ – начало радиоактивных выпадений для Брянской области, $T_{134} = 2,06$ года, $T_{137} = 30$ лет.

Подставив значения дозовых коэффициентов и выражение (4) в формулу (3), получим:

$$e_{\text{int}137}(t) = \frac{e_{\text{int}(134+137)}(t)}{1 + 0,79 \cdot \exp(-0,693 \cdot (t - t_0) / 2,21))}. \quad (5)$$

Если заменить $e_{\text{int}(137+134)}(t)$ формулой (2) с коэффициентами из таблицы 1, то уравнение регрессии для дозы внутреннего облучения от ^{137}Cs , нормированной на плот-

ность загрязнения почвы этим радионуклидом, будет выглядеть следующим образом:

$$e_{\text{int}137}(t) = \frac{91 \cdot \exp(-0,693 \cdot (t - t_0) / (0,108 \cdot (t - t_0) + 0,25))}{1 + 0,79 \cdot \exp(-0,693 \cdot (t - t_0) / 2,21))} \quad (6)$$

Предположим, что отношение $e_{\text{int}137}(t+n)/e_{\text{int}137}(t)$ изменяется по экспоненциальному закону, то есть $e_{\text{int}137}(t+n) = e_{\text{int}137}(t) \times \exp(-0,693 \times n / T_{\text{int}137}(t;n))$, где n – временной интервал усреднения, $T_{\text{int}137}(t;n)$ – период уменьшения дозы внутреннего облучения от ^{137}Cs для календарного года t в диапазоне усреднения n , лет. Тогда $T_{\text{int}137}(t;n)$ можно рассчитать следующим образом:

$$T_{\text{int}137}(t;n) = 0,693 \times n \times \ln(e_{\text{int}137}(t) / e_{\text{int}137}(t+n)) \quad (7)$$

Рассчитав некоторое количество численных значений $T_{\text{int}137}(t;n)$ и подобрав к ним уравнение регрессии, получим следующую формулу:

$$T_{\text{int}137}(t;n) = 0,047 \times (t - t_0)^2 + (1 + 0,12 \times n) \times (t - t_0) + 0,046 \times n + 0,18. \quad (8)$$

Дозу внешнего облучения цезием-137 рассчитывают по формуле:

$$E_{\text{ext}137}(t) = e_{\text{ext}137}(t) \times \sigma_{137}(t), \text{ мЗв}, \quad (9)$$

где: $\sigma_{137}(t)$, мЗв·м²/Бк – средняя плотность загрязнения почвы цезием-137 на территории населенного пункта для года t (по данным Росгидромета);

$e_{\text{ext}137}(t)$, мЗв·м²/Бк – дозовый коэффициент.

Значения коэффициента $e_{\text{ext}137}(t)$ приведены в таблице 2. В соответствии с МУ 2.6.1.784-99³, они определены для типовой структуры жилого фонда, характерной для сельских населенных пунктов в западных районах Брянской области: 40% взрослых жителей относятся к группе 1 и проживают в деревянных одноэтажных домах; 20% относятся к группе 1 и проживают в кирпичных одноэтажных домах; 20% относятся к группе 2 и проживают в деревянных одноэтажных домах; 20% относятся к группе 2 и проживают в кирпичных одноэтажных домах.

Если присвоить значение $e_{\text{ext}137}(t)$ в трех последних столбцах таблицы серединам годовых интервалов, то этот коэффициент описывается следующим уравнением регрессии:

$$e_{\text{ext}137}(t) = 25,3 \times \exp(-0,693 \times (t - t_0) / (0,21 \times (t - t_0) + 0,41)). \quad (10)$$

Если применить описанный выше алгоритм с использованием формулы (7) к дозовому коэффициенту $e_{\text{ext}137}(t)$, то можно получить формулу, описывающую изменение $T_{\text{ext}137}(t;n)$ со временем:

$$T_{\text{ext}137}(t;n) = 0,11 \times (t - t_0)^2 + (0,11 \times n + 0,42) \times (t - t_0) + 0,21 \times n + 0,41. \quad (11)$$

Примечание: $T_{\text{ext}137}(t;0)$ и $T_{\text{int}137}(t;0)$ – это периоды уменьшения $e_{\text{ext}137}(t)$ и $e_{\text{int}137}(t)$ соответственно, нормированные на плотность загрязнения почвы ^{137}Cs для календарного года t .

³ Методические указания МУ 2.6.1.784-99 «Зонирование населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, по критерию годовой дозы облучения населения». Минздрав России, Москва, 1999. [Methodical guidelines MU 2.6.1.784-99 "Zoning of the residual places in the Russian Federation radioactively contaminated due to the Chernobyl NPP accident based on the criteria of the annual dose to the public", Ministry of Healthcare of Russia, Moscow, 1999 (In Russ.)]

Таблица 2

Значения коэффициента $e_{\text{ext}137}$ для сельских населенных пунктов

[Table 2]

Values of the coefficient $e_{\text{ext}137}$ for the rural residential places

Календарный год [Calendar Year]	1986	1989	1991	1992	1993	1999–2001	2005–2009	2012–2020
$e_{\text{ext}137}$, мЗв×м ² /МБк [$e_{\text{ext}137}$, mSv×m ² /MBq]	25,3*	3,4	2,4	2,1	1,9	1,38	1,2	1,1
Источник данных [Source]	[13]	[14]	МУ 2.7.7.001-93 ⁴ [MU 2.7.7.001-93 ⁴]			МУ 2.6.1.784-99 ³ [MU 2.6.1.784-99 ³]	МУ 2.6.1.2319-08 ⁵ [MU 2.6.1.2319-08 ⁵]	МУ 2.6.1.3154-13 ⁶ [MU 2.6.1.3154-13 ⁶]

* значение $e_{\text{ext}137}$ для 1986 г. рассчитано для случая, если человек в течение всего 1986 г. проживал на загрязненной территории (чтобы получить реальное значение коэффициента, его нужно умножить на 0,67).

[Value of $e_{\text{ext}137}$ for 1986 were calculated for the full-time residence of an individual on the contaminated territory in 1986 (for the real value, the coefficient should be multiplied by 0,67)].

Рассчитать величину дозы внутреннего облучения, нормированную на плотность загрязнения почвы цезием-137, $e_{\text{int}137}(t_2)$, по ее известному значению в год t_1 можно по следующей формуле:

$$e_{\text{int}137}(t_2) = e_{\text{int}137}(t_1) \times \exp(-0,693 \times n / T_{\text{int}137}(t_1; n)), \quad (12)$$

где $n = t_2 - t_1$.

Аналогично можно рассчитать значение $e_{\text{ext}137}(t_2)$ по известному значению $e_{\text{ext}137}(t_1)$:

$$e_{\text{ext}137}(t_2) = e_{\text{ext}137}(t_1) \times \exp(-0,693 \times n / T_{\text{ext}137}(t_1; n)), \quad \text{где } n = t_2 - t_1. \quad (13)$$

Допустим, нужно оценить величину $e_{\text{int}137}$ для 2056 г. по ее известному значению в 2010 г. Период полууменьшения $T_{\text{int}137}$ для 2010 г. в интервале усреднения $n = 2056 - 2010 = 46$ лет, рассчитанный по формуле (8), будет равен $T_{\text{int}137}(2010; 46) = 183$ года. Подставив это значение в формулу (12), получим $e_{\text{int}137}(2056) = 0,84 \times e_{\text{int}137}(2010)$, а для дозы внутреннего облучения (без нормирования на плотность загрязнения почвы цезием-137) $E_{\text{int}137}(2056) = 0,29 \times E_{\text{int}137}(2010)$.

Что касается внешнего облучения, то период полууменьшения $e_{\text{ext}137}$ для 2010 г. в интервале усреднения $n = 46$ лет по формуле (11) будет равен $T_{\text{ext}137}(2010; 46) = 201$

год. Подставив это значение в формулу (13), получим $e_{\text{ext}137}(2056) = 0,85 \times e_{\text{ext}137}(2010)$, а для дозы внешнего облучения (без нормирования на плотность загрязнения почвы цезием-137) $E_{\text{ext}137}(2056) = 0,30 \times E_{\text{ext}137}(2010)$.

В качестве иллюстрации динамика изменения со временем $T_{\text{ext}137}(t, n)$ и $T_{\text{int}137}(t, n)$ для дискретных значений $n = 0, 3, 10, 20, 50$ и 70 лет приведена на рисунке 2.

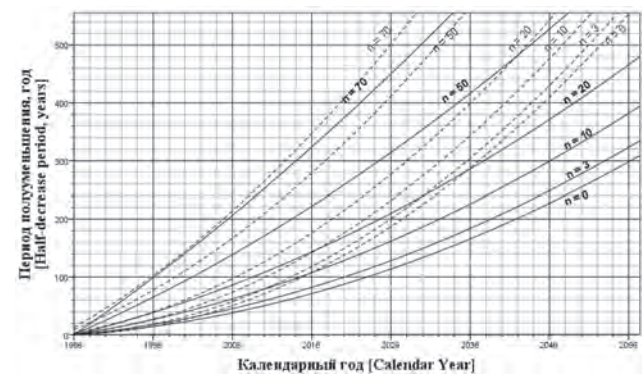


Рис. 2. Периоды полууменьшения $T_{\text{ext}137}(t; n)$ (пунктирные линии) и $T_{\text{int}137}(t; n)$ (сплошные линии)

[Fig. 2. Periods of half-decrease of $T_{\text{ext}137}(t; n)$ (dotted lines) and $T_{\text{int}137}(t; n)$ (solid lines)]

⁴ Методические указания МУ 2.7.7.001-93 «Определение средней годовой эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС». Госкомсанэпиднадзор Российской Федерации, Москва, 1993. [Methodical guidelines MU 2.7.7.001-93 "Assessment of the average annual effective dose to the public in residual places radioactively contaminated due to the Chernobyl NPP accident". Goscomsanepidnadzor of the Russian Federation, Moscow, 1993 (In Russ.)]

⁵ Методические указания МУ 2.6.1.2319—08: Доп. 2 к МУ 2.6.1.784—99 «Зонирование населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, по критерию годовой дозы облучения населения». Роспотребнадзор, Москва, 2008. [Methodical guidelines MU 2.6.1.2319-08. Addendum 2 to MU 2.6.1.784-99 Zoning of the residual places in the Russian Federation radioactively contaminated due to the Chernobyl NPP accident based on the criteria of the annual dose to the public", Rospotrebnadzor, Moscow, 2008 (In Russ.)]

⁶ Методические указания МУ 2.6.1.3154-13: Изменения № 3 к МУ 2.6.1.784-99 «Зонирование населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, по критерию годовой дозы облучения населения». Роспотребнадзор, Москва, 2013. [Methodical guidelines MU 2.6.1.3154-13. Addendum 3 to MU 2.6.1.784-99 Zoning of the residual places in the Russian Federation radioactively contaminated due to the Chernobyl NPP accident based on the criteria of the annual dose to the public", Rospotrebnadzor, Moscow, 2013 (In Russ.)]

Изменения со временем эффективных периодов полураспада (с учетом радиоактивного распада ^{137}Cs) дозы внешнего облучения и дозы внутреннего облучения иллюстрируются рисунком 3.

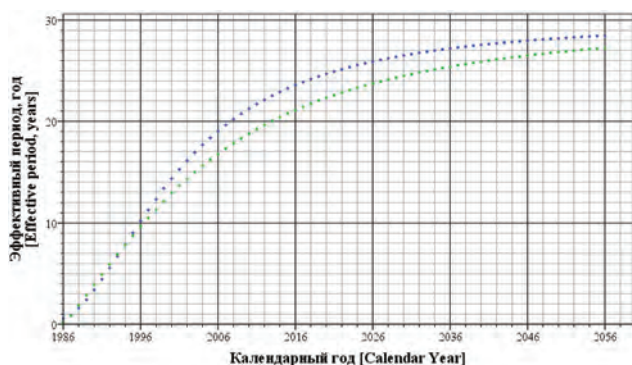


Рис. 3. Изменение со временем эффективных периодов полураспада дозы внешнего облучения (верхняя кривая) и дозы внутреннего облучения (нижняя кривая)

[Fig. 3. Trends in the changes of the effective half-decrease periods for dose from external exposure (upper curve) and dose from internal exposure (lower curve)]

Отношение $E_{\text{ext}137}(t)/E_{\text{int}137}(t) = e_{\text{ext}137}(t)/e_{\text{int}137}(t)$, где $e_{\text{ext}137}(t)$ – значения, рассчитанные по формуле (10); $e_{\text{int}137}(t)$ – значения, рассчитанные по формуле (2) с коэффициентами из таблицы 1. Изменение со временем численных значений этого отношения иллюстрируется рисунком 4.

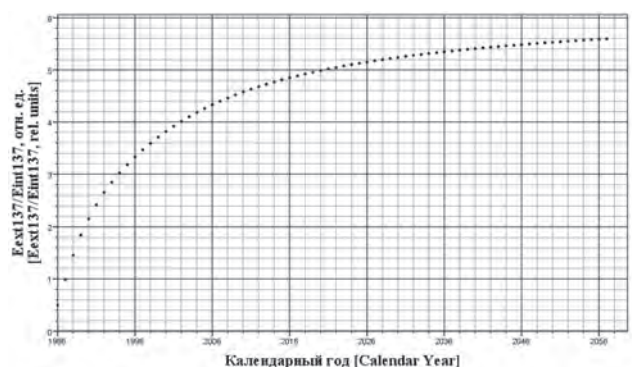


Рис. 4. Изменение со временем численных значений отношения дозы внешнего облучения ($E_{\text{ext}137}$) к дозе внутреннего облучения ($E_{\text{int}137}$)

[Fig. 4. Trends of changes in the ratios of dose from external exposure to the dose from internal exposure]

Видно, что в отдаленный период времени доза внешнего облучения существенно превышает дозу внутреннего облучения. Связано это, скорее всего, с тем, что рацион питания местных жителей был и остается слабо ориентирован на потребление местных пищевых продуктов как из-за почти полного отсутствия своего молочного скота, так и из-за действия контрмер и самоограничений населения в потреблении этих продуктов. Тем не менее, это характеризует реальную ситуацию в Брянской области и динамику ее изменения со временем, в том числе и на прогнозируемые годы.

Динамика изменения со временем численных значений отношения дозы внешнего облучения к дозе внутреннего облучения описывается уравнением:

$$e_{\text{ext}137}(t)/e_{\text{int}137}(t) = 1,9 + (55 \times (t - t_0) - 170) / (12 \times (t - t_0) + 130). \quad (14)$$

Зная это отношение, можно оценить дозу $E_{\text{ext}137}(t)$ по дозе $E_{\text{int}137}(t)$ и наоборот.

Суммарную среднюю годовую эффективную дозу от ^{137}Cs для взрослого населения, проживающего в сельских населенных пунктах, можно оценить по формуле:

$$E_{\Sigma}(t) = E_{\text{int}137}(t) + E_{\text{ext}137}(t) = [e_{\text{int}137}(t) + e_{\text{ext}137}(t)] \times 0,037 \times \sigma_{137}(t_0) \times \exp(-0,693 \times (t - t_0) / T_{137}), \quad (15)$$

где: $\sigma_{137}(t_0)$ – плотность загрязнения почвы ^{137}Cs на момент аварии ($\text{Ки}/\text{км}^2$);

T_{137} – период полураспада ^{137}Cs .

Дозу облучения за 1986 г., рассчитанную по формулам (6) и (10), нужно умножить на коэффициент 0,67, так как основные выпадения произошли не в начале года, а в конце апреля – начале мая 1986 г.

Для иллюстрации на рисунке 5 приведен график изменения со временем суммарной средней годовой эффективной дозы облучения населения цезием-137 при плотности загрязнения почвы $\sigma_{137} = 30 \text{ Ки}/\text{км}^2$.

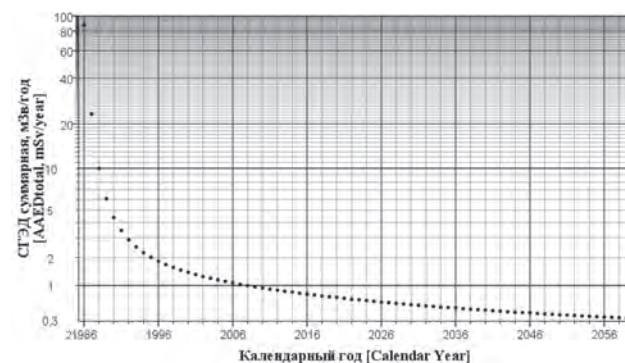


Рис. 5. Суммарная средняя годовая эффективная доза (СГЭД_{суммарная}) облучения от ^{137}Cs для взрослых жителей Брянской области при условии отсутствия защитных мероприятий (при $\sigma_{137} = 30 \text{ Ки}/\text{км}^2$)

[Fig. 5. Total average annual effective dose from ^{137}Cs (AAED_{total}) for adult residents of the Bryansk region without the protective measures ($\sigma_{137} = 30 \text{ Ku}/\text{km}^2$)]

Среднюю суммарную прогнозируемую накопленную эффективную дозу (ПНЭД_Σ) для взрослых жителей Брянской области, которые проживают в течение 50 лет на загрязненных территориях, можно рассчитать по формуле:

$$\text{ПНЭД}_{\Sigma}(t) = \sum_t^{t+50} E_{\Sigma}(t), \quad (16)$$

где t – год начала проживания на загрязненной территории.

График ПНЭД_Σ(t), рассчитанный для плотности загрязнения $\sigma_{137} = 30 \text{ Ки}/\text{км}^2$, представлен на рисунке 6.

Теперь, используя полученные результаты, можно выполнить более точную оценку прогнозируемых средних годовых эффективных доз внутреннего облучения населения Брянской области в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС (вплоть до 2056 г.).

Что касается прогноза средних годовых эффективных доз внешнего облучения, то пока нет существенных оснований для внесения изменений в методические указания МУ 2.6.1.2222-07 «Прогноз доз облучения населения радионуклидами цезия и стронция при их попадании в окружающую среду», утвержденные в 2007 г.

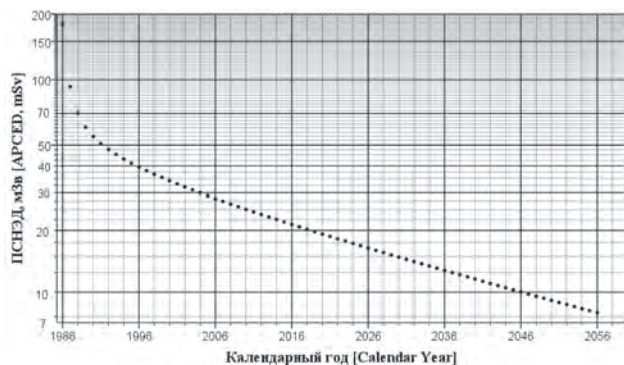


Рис. 6. Суммарная (внешнее + внутреннее облучение) прогнозируемая средняя накопленная эффективная доза (ПСНЭД) от ^{137}Cs для взрослых жителей Брянской области при условии отсутствия защитных мероприятий – в зависимости от года начала проживания на загрязненной территории (при $\sigma_{137}=30 \text{ Ки/км}^2$)

[Fig. 6. Total (external+internal exposure) average predicted cumulative effective dose (APCED) from ^{137}Cs for adult residents of the Bryansk region without the protective measures – based on the starting year of residence at the contaminated territory ($\sigma_{137}=30 \text{ Ku/km}^2$)]

Таким образом, с использованием всех полученных в настоящей работе результатов, можно не только выполнить расчет прогнозируемых средних годовых эффективных доз внутреннего облучения населения, но и дать прогноз суммарных доз (внутреннее + внешнее облучение).

В таблице 3 приведено распределение населенных пунктов Брянской области, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения, по величине прогнозируемой суммарной средней годовой эффективной дозы облучения жителей в разные годы (вплоть до 2056 г.).

В таблице 4 приведено распределение населенных пунктов Брянской области, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения, по величине прогнозируемой суммарной средней годовой эффективной дозы облучения критических групп населения в разные годы (вплоть до 2056 г.).

Заключение

Исследования закономерностей формирования доз облучения населения радиоактивно загрязненных субъектов Российской Федерации необходимы для уточнения текущих дозовых нагрузок и их прогноза на последующие периоды времени. На примере Брянской области, с использованием новых методических приемов, выполнена оценка периодов полуменьшения средних годовых эффективных доз внутреннего облучения населения, нормированных на плотность загрязнения почвы ^{137}Cs в соответствующий год (по данным СИЧ-измерений). Это позволило внести изменения в параметры модели внутреннего облучения, использованные ранее для расчетов прогнозируемых доз в соответствии с методическими указаниями МУ 2.6.1.2222-07 «Прогноз доз облучения населения радионуклидами цезия и стронция при их попадании в окружающую среду», утвержденными в 2007 г.

Таблица 3

Распределение населенных пунктов Брянской области, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения, по величине прогнозируемой суммарной средней годовой эффективной дозы облучения жителей в разные годы

[Table 3]

Distribution of the settlements in the Bryansk region referred to the radioactively contaminated zones by the value of predicted total average annual effective dose to the public in different years]

Год [Year]	Количество НП, в интервалах доз, мЗв/год [Number of residual places in the corresponding dose intervals, mSv/year]			Максимум [Maximum]
	< 0,3	0,3–1,0	≥ 1,0	
2026	627	117	5	2,2
2036	674	70	5	1,7
2046	709	38	2	1,3
2056	734	15	–	0,97

Таблица 4

Распределение населенных пунктов Брянской области, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения, по величине прогнозируемой суммарной средней годовой эффективной дозы облучения критических групп населения в разные годы

[Table 4]

Distribution of the settlements in the Bryansk region referred to the radioactively contaminated zones by the value of predicted total average annual effective dose to the critical groups of the public in different years]

Год [Year]	Количество НП, в интервалах доз, мЗв/год [Number of residual places in the corresponding dose intervals, mSv/year]			Максимум [Maximum]
	< 0,3	0,3 – 1,0	≥ 1,0	
2026	485	221	43	4,3
2036	549	186	14	3,3
2046	600	143	6	2,5
2056	637	107	5	2,0

Что касается прогноза средних годовых эффективных доз внешнего облучения, то пока нет существенных оснований для внесения изменений в указанный документ.

Полученные результаты позволили выполнить уточненный прогноз доз облучения населения и его критических групп, проживающих на радиоактивно загрязненных вследствие аварии на Чернобыльской АЭС территориях Брянской области, на период вплоть до 2056 г. и, благодаря этому, выделить населенные пункты, в которых оправдано проведение соответствующих защитных мер.

Литература

1. Methodical document «Forecasting doses to the public and its critical groups in the remote period after the Chernobyl accident» developed under the IAEA Project: RER/3/004 «Radiological support for the rehabilitation of areas affected as a result of the accident at the Chernobyl NPP», IAEA, Vienna, 2008.
2. Брук Г.Я., Братилова А.А., Громов А.В., и др. Развитие единой системы оценки и прогноза доз облучения населения, проживающего в реперных населенных пунктах приграничных территорий Союзного государства, пострадавших вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. 2017. № 1(17). С. 168–175.
3. Балонов М.И., Романович И.К., Брук Г.Я., и др. Динамика средних годовых и накопленных доз облучения взрослого населения Российской Федерации после аварии на Чернобыльской АЭС // Актуальные вопросы радиационной гигиены: Материалы международной научно-практической конференции. СПб, 2018. С. 24–29.
4. Брук Г.Я., Братилова А.А., Базюкин А.Б., и др. Обоснование перечня пострадавших вследствие аварии на ЧАЭС населенных пунктов Российской Федерации, предназначенных к переходу от состояния проживания населения в условиях радиационной аварии к условиям нормальной жизнедеятельности // Актуальные вопросы радиационной гигиены: Материалы международной научно-практической конференции. СПб, 2018. С. 68–72.
5. Власов О.К., Брук Г.Я., Щукина Н.В. Разработка и верификация метода реконструкции динамики эффективных доз облучения населения РФ после аварии на ЧАЭС // Радиация и риск. 2017. Т. 26, № 3. С. 28–45.
6. Балонов М.И., Брук Г.Я., Голиков В.Ю., и др. Облучение населения Российской Федерации вследствие аварии на Чернобыльской АЭС // Радиация и риск. М.-Обнинск, 1996. Вып. 7. С. 39–72.
7. Shutov V.N., Bruk G.Ya., Balonov M.I., et al. Cesium and strontium radionuclide migration in the agricultural ecosystem and estimation doses to the population. The Chernobyl Papers, Washington: Research enterprises, 1993. Vol. 1. P. 167–218.
8. Shutov V.N., Bruk G.Ya., Basalaeva L.N., et al. Dynamics of ^{137}Cs transfer from soil into forest mushrooms and berries after the Chernobyl accident. UIR Topical meeting, Mol – Belgium. Book of abstracts, 1998. P. 48–49.
9. Bruk G.Ya., Shutov V.N., Balonov M.I., et al. Dynamics of ^{137}Cs content in agricultural food products produced in regions of Russia contaminated after the Chernobyl accident // Radiat. Prot. Dosimetry. 1998. Vol. 76, No. 3. 169–178.
10. Брук Г.Я., Базюкин А.Б., Братилова А.А., Яковлев В.А. Закономерности формирования и прогноз доз облучения населения Российской Федерации и его критических групп в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2 (спецвыпуск). С. 66–74.
11. Голиков В.Ю. Анализ долгосрочной динамики доз внешнего облучения населения после Чернобыльской аварии // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 4. С. 39–50.
12. Golikov V.Yu., Balonov M.I., Jacob P. External Exposure of the Population Living in Areas of Russia Contaminated due to the Chernobyl Accident // Radiat. Environ. Biophysics. 2002. Vol. 41, No 10. P. 185–193.
13. Панченко С.В., Савкин М.Н., Шутов В.Н. Радиационно-гигиеническая обстановка и дозы облучения населения // Препринт № IBRAE-97-10. Москва.
14. Пономаренко В.В., Панов А.В., Марочкина Е.В. Оценка изменения доз облучения населения в различные периоды после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиация и риск. 2014. Т. 23, № 3. С. 100–114.

Поступила: 18.04.2020 г.

Яковлев Вячеслав Арсентьевич – 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. Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: yava1952@gmail.com

Брук Геннадий Яковлевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией 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

Для цитирования: Яковлев В.А., Брук Г.Я. Новые методические приемы оценки прогнозируемых доз внутреннего облучения населения Брянской области в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 68–76. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-68-76

A new approach for the methodology of the assessment of the predicted doses to the public of the Bryansk region in the remote period after the Chernobyl NPP accident

Vyacheslav A. Yakovlev, Gennadiy Ya. Bruk

This study is aimed at the evaluation of the trends of the doses from internal exposure of the adult public of the Bryansk region due to the consumption of the main dose-forming food products in the remote period after the Chernobyl NPP accident and the methodical features of the assessment of the predicted doses from the internal exposure. A new methodical approach to the calculation of the predicted doses of the public from internal exposure is based on the single exponential model of the change of the dose with a time-dependent period of a half-decrease. Results of the study allowed increasing the precision of calculation of the predicted doses to the public of the Bryansk region up to 2056. A similar method (single exponential model) can be applied for the external exposure as well. That allowed calculating predicted doses of total (external + internal) exposure. As an example, the paper includes the distribution of all settlements in the Bryansk region referred to the zones of radioactive contamination by the predicted average annual effective dose to the public and critical groups in the different time periods after the accident.

Key words: the Chernobyl NPP accident, public, radioactive contamination, caesium-137, caesium-134, dose, predicted dose.

References

1. Methodical document «Forecasting doses to the public and its critical groups in the remote period after the Chernobyl accident» developed under the IAEA Project: RER/3/004 «Radiological support for the rehabilitation of areas affected as a result of the accident at the Chernobyl NPP», IAEA, Vienna, 2008.
2. Bruk GYa, Bratilova AA, Gromov AV, Zhesko TV, Kaduka AN, Kaduka MV, et al. Development of the joint system of the assessment and prognosis of the doses to the public residing in the reference residual places in the bordering territories of the Union State, affected due to the Chernobyl NPP accident. *Mediko-biologicheskie problemy zhiznedeystel'nosti = Medical-biological problems of the life sustenance*. 2017;1(17): 168-175 (In Russian).
3. Balonov MI, Romanovich IK, Bruk GYa, Golikov VYu, Bazyukin AB, Bratilova AA. Dynamics of the average annual and accumulated doses to the adult public of the Russian Federation after the Chernobyl NPP accident. Actual issues of the radiation hygiene. Proceedings of the international scientific-practical conference. St.-Petersburg; 2018: 24-29 (In Russian).
4. Bruk GYa, Bratilova AA, Bazyukin AB, Vlasov AY, Zhesko TV, Kaduka MV, et al. Justification of the list of the residual places in the Russian Federation affected by Chernobyl NPP accident for the transition from the residence in radiation accident conditions to the normal life sustenance. Actual issues of the radiation hygiene. Proceedings of the international scientific-practical conference. St.-Petersburg; 2018: 68-72 (In Russian).
5. Vlasov OK, Bruk GYa, Shchukina NV. Development and validation of the method of the reconstruction of the dynamics of the effective doses of the public of the Russian Federation after the Chernobyl NPP accident. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*, 2017;26(3): 28-45 (In Russian).
6. Balonov MI, Bruk GYa, Golikov VYu, Erkin VG, Zvonova IA, Parkhomenko VI, et al. Exposure of the public of the Russian Federation due to the Chernobyl NPP accident. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. Moscow-Obninsk; 1996;7: 39-72 (In Russian).
7. Shutov VN, Bruk GYa, Balonov MI, Parhomenko VI, Pavlov IJ. Cesium and strontium radionuclide migration in the agricultural ecosystem and estimation doses to the population. The Chernobyl Papers, Research enterprises, Washington; 1993;1: 167-218.
8. Shutov VN, Bruk GYa, Basalaeva LN, Kaduka MV, Balonov MI. Dynamics of ¹³⁷Cs transfer from soil into forest mushrooms and berries after the Chernobyl accident. UIR Topical meeting, Mol – Belgium. Book of abstracts; 1998: 48-49.
9. Bruk GYa, Shutov VN, Balonov MI, Basalaeva LN, Kislov MV. Dynamics of ¹³⁷Cs content in agricultural food products produced in regions of Russia contaminated after the Chernobyl accident. *Radiat. Prot. Dosimetry*. 1998;76(3): 169-178.
10. Bruk GYa, Bazyukin AB, Bratilova AA, Yakovlev VA. 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 period. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2(Special Issue)): 66-74. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-2s-66-74>
11. Golikov VYu. Analysis of the long-term dynamics of external doses of the population after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(4): 39-50. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-4-39-50>
12. Golikov VYu, Balonov MI, Jacob P. External Exposure of the Population Living in Areas of Russia Contaminated due to the Chernobyl Accident. *Radiat. Environ. Biophysics*. 2002;41(10): 185-193.
13. Panchenko SV, Savkin MN, Shutov VN. Radiation-hygienic situation and doses to the public. Pre-print № IBRAE-97-10. Moscow. (In Russian)
14. Ponomarenko VV, Panov AV, Marochkina EV. Assessment of the changes in the doses of the public in different periods after the Chernobyl NPP accident. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2014;23(3): 100-114. (In Russian)

Received: April 18, 2020

Vyacheslav A. Yakovlev

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

Address for correspondence: Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: yava1952@gmail.com

For correspondence: Vyacheslav A. Yakovlev – Scientist, Internal Exposure 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, St.-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: yava1952@gmail.com)

Gennadiy Ya. Bruk – Head of the Internal Exposure Laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

For citation: Yakovlev V.A., Bruk G.Ya. A new approach for the methodology of the assessment of the predicted doses to the public of the Bryansk region in the remote period after the Chernobyl NPP accident. *Radiatsionnaya Gygiena* = *Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No. 3. P. 68-76. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-68-76

Оценка дозовых параметров, определяющих вероятность возникновения детерминированных эффектов в коже пациентов, подвергающихся интервенционным рентгенологическим исследованиям

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

Работа посвящена оценке дозовых параметров, определяющих вероятность возникновения детерминированных эффектов в коже пациентов, подвергающихся высокодозным интервенционным рентгенологическим исследованиям. Особое внимание уделено анализу геометрии распределения поглощенной дозы по поверхности тела пациента при проведении основных видов интервенционных исследований. Целью работы является уточнение методики оценки максимальной поглощенной дозы в коже пациентов с учетом новых данных. Сбор данных о параметрах проведения исследований проводили в 9 лечебных учреждениях города Санкт-Петербурга, всего были получены подробные сведения о более чем 400 процедурах. Собирали данные о методиках проведения основных видов интервенционных вмешательств, регистрировали физико-технические, геометрические и дозиметрические параметры проведения для каждой процедуры. На основании статистики распределения геометрических параметров проведения процедур (размера полей облучения и используемых проекций) были определены возможные локализации и величины поглощенной дозы в определенных участках кожи. Представлена обновленная методика оценки кожной дозы на основании регистрируемой большинством ангиографических аппаратов дозиметрической величины произведения дозы на площадь с учетом используемых размеров полей облучения. В качестве альтернативы предложена оценка максимального значения поглощенной дозы в коже на основании накопленного значения воздушной кермы в опорной точке пациента — точке, «репрезентативной» для кожи пациента с учетом наклонов трубки в ходе проведения исследований. Такой подход не требует информации о размере поля облучения, при котором проходит процедура. На основании полученных данных рассчитаны консервативные значения коэффициентов перехода от измеряемых дозиметрических величин к поглощенной дозе в максимально облученном участке кожи и контрольные значения данных величин для предотвращения детерминированных эффектов в коже.

Ключевые слова: интервенционная радиология, поглощенная доза в коже, коэффициенты перехода.

Введение

Интервенционные рентгенологические исследования (ИРЛИ) играют важную роль в современной медицине, однако характеризуются значительно большими по сравнению с обычными рентгенологическими исследованиями уровнями облучения пациентов и персонала [1, 2]. Помимо оценки величины эффективной дозы как меры риска возникновения стохастических эффектов, для процедур интервенционной радиологии необходима также оценка вероятности возникновения детерминированных эффектов в коже пациента [1–5]. Особенно важно это для процедур, после которых уже были зафиксированы случаи тканевых реакций: исследования сосудов сердца и головного мозга, терапевтические процедуры в

абдоминальной области и области малого таза [1, 3–7]. Количественной характеристикой, определяющей вероятность возникновения данных эффектов, является максимальное значение поглощенной дозы в наиболее облучаемом участке кожи — максимальная поглощенная доза в коже (МПДК) [2].

Существует два основных подхода к оценке дозы в наиболее облучаемом участке кожи: доза в коже может быть измерена напрямую или оценена ретроспективно на основании измерений других величин [8].

Прямые измерения на поверхности кожи могут быть выполнены с помощью сетки термолюминесцентных дозиметров, рентгеночувствительных или радиохромных пленок, а также прямыми онлайн-измерениями [4, 5, 9].

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

Как правило, это – дорогостоящие операции, требующие дополнительного технического оснащения. Прямые измерения используются преимущественно для научных целей или в рамках каких-либо проектов и малоприменимы в ежедневной практике [8, 9].

Ретроспективная оценка величины МПДК строится на основании измерений других параметров, регистрируемых в ходе проведения ИРЛИ. Современные ангиографические аппараты позволяют регистрировать и сохранять для каждого проводимого исследования итоговые значения таких параметров, как общее время рентгеноскопии [мин], кумулятивная (накопленная) доза в опорной точке (КД) [мГр] и суммарное значение произведения дозы на площадь (ПДП) [сГр*см² или мГр*м²]. Также доступна информация по количеству сделанных серий снимков в режиме рентгенографии. Эти данные отображаются на экранах монитора в период проведения и окончания исследования, а также сохраняются в базе данных аппарата в истории процедуры (Exam protocol), пример их отображения приведен на рисунке 1.



Рис. 1. Примеры отображения дозиметрических данных ИРЛИ
[Fig. 1. Examples of displaying a dosimetric data of procedure]

В настоящее время основной дозиметрической величиной, отображающей уровень облучения кожи пациента, принято считать КД – значение накопленной воздушной кермы (поглощенной дозы в воздухе) во входной опорной точке пациента [4]. Еще в 2000 г. Международная электротехническая комиссия (МЭК) в публикации 60601-2-43 представила концепцию КД – накопленного значения опорной воздушной кермы в месте, которое является «репрезентативным» для кожи пациента – на расстоянии 15 см от изоцентра в направлении фокусного пятна, с учетом возможных наклонов трубки в ходе проведения исследования.

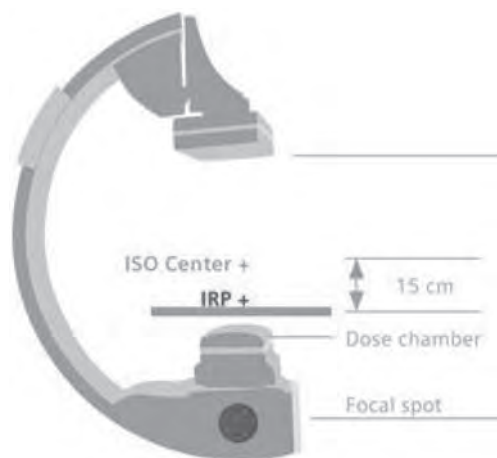


Рис. 2. Локализация входной опорной точки пациента (IRP – Interventional Reference Point) для рентгеновского аппарата для интервенционных процедур типа С-дуга
[Fig. 2. Localization of Interventional Reference Point (IRP) for X-ray C-arm type unit]

Изначально концепция КД была разработана для коронарных исследований, и применимость данной величины для этого типа ИРЛИ была обоснована МЭК. Что касается использования КД для оценки дозы в коже при некоронарных исследованиях, было проведено большое исследование, в котором изучали взаимосвязь между суммарным временем рентгеноскопии за исследование, ПДП, КД и напрямую измеренным значением МПДК [5]. Данные были получены в общей сложности для 2142 процедур (исследования сердца в данной работе не рассматривались), для 800 из которых были проведены натурные измерения кожной дозы. В работе было показано, что КД имеет наибольшую корреляцию с МПДК ($r=0,86$), но корреляция МПДК с ПДП также достаточно высока ($r=0,85$). ПДП не рекомендовано использовать для целей оценки МПДК ввиду того, что при большом значении суммарного ПДП нельзя быть уверенным, является ли это следствием работы с высокой дозой на малых полях или использованием больших полей облучения при низкой дозе [5]. Согласно рекомендациям МЭК, значения КД нужно использовать для оценки вероятности возникновения кожных реакций, а измеренные значения ПДП – для оценки эффективной дозы пациентов.

В МУ 2.6.1.2944-11 «Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований» есть раздел, посвященный оценке МПДК при проведении ИРЛИ, и даны соответствующие коэффициенты перехода к МПДК от суммарного значения ПДП за исследование, а также контрольные значения ПДП для предотвращения детерминированных эффектов в коже, однако без привязки к размерам используемых полей. Кумулятивная доза в МУ 2.6.1.2944-11 не упомянута.

Цель исследования – анализ распределения поглощенной дозы в коже пациентов при проведении основных видов ИРЛИ и уточнение методики оценки МПДК с учетом накопленных данных.

Материалы и методы

Сбор данных о параметрах проведения ИРЛИ проводили в отделениях сосудистой и интервенционной хирургии, рентгенохирургических методов диагностики и лечения и ангиографических отделениях в 9 лечебных учреждениях города Санкт-Петербурга. Всего были получены подробные данные о более чем 400 процедурах. Собирались данные о методиках проведения основных видов ИРЛИ, физико-технические, геометрические и дозиметрические параметры проведения каждой процедуры.

Основными факторами, влияющими на величину МПДК при известных дозиметрических параметрах ПДП и КД, являются размер поля облучения и положение пучка излучения по отношению к телу пациента, а также изменения этих параметров в процессе проведения исследования. Необходимо вычислить, какой процент от общего облучения всей кожи пациента в ходе исследования приходится на участок с максимальной концентрацией.

Величиной суммарной кожной дозы (СКД) может служить либо величина КД с поправкой на коэффициент обратного рассеяния (В), либо, в случае отсутствия данных о величине КД, СКД оценивается на основе измеренного

значения ПДП и площади поля облучения во входной плоскости пациента (S) по формуле:

$$СКД = КД \cdot B = \frac{ПДП \cdot B}{S} \quad (1)$$

Размеры полей во входной плоскости пациента вычисляли на основании собранных геометрических параметров рабочих полей и расстояний между источником, пациентом и приемником. К сожалению, и это подтверждено в ходе сбора данных, не все аппараты отображают КД; также в одной из клиник (не вошла в работу) был аппарат, не оснащенный проходной ионизационной камерой и, соответственно, не измеряющий даже значения ПДП.

Для каждого вида исследований были рассмотрены наиболее используемые проекции облучения и их процентное соотношение друг к другу. На основании статистики распределения используемых проекций и рабочих полей оценено наиболее вероятное распределение дозы на поверхности кожи пациента и коэффициент концентрации, характерный для каждого вида ИРЛИ для консервативной оценки значения МПДК. Коэффициент концентрации – это величина, показывающая, какой процент от общего значения СКД может быть сконцентрирован в месте возможной локализации МПДК при консервативной оценке развития сценария облучения.

Таким образом, величины дозовых коэффициентов перехода от измеряемых величин КД и ПДП к МПДК могут быть вычислены по следующим формулам:

$$Kd = \frac{МПДК}{ПДП} = \frac{K_{\%} \cdot B}{S} \quad (2)$$

$$Kd_{КД} = \frac{МПДК}{КД} = K_{\%} \cdot B \quad (3)$$

Где Kd – дозовый коэффициент перехода от измеренного значения ПДП к МПДК, МГр/(Гр·см²);

Kd_{КД} – дозовый коэффициент перехода от КД к МПДК, отн. ед.;

K_% – коэффициент концентрации распределения дозы в коже, отн. ед.;

B – коэффициент обратного рассеяния, отн. ед.;

S – площадь поля во входной плоскости пациента, см².

Результаты измерений и наблюдений

Данные по исследованиям сосудов сердца

Преимущественное положение трубки: краниально-каудальный наклон ±(20°-40°) и наклон вправо-влево ±(0°-50°). В ходе проведения диагностического исследования положение трубки постоянно меняется. Присутствуют серии снимков, выполненные в положениях трубки LAO 90° (60°, 30°) без краниального наклона. Для терапевтических исследований характерна «преимущественная проекция» – наиболее подходящая для визуализации области, подвергающейся лечению. Если исследование комбинированное (и диагностика, и терапия), то его диагностическая часть характеризуется широким распределением дозы в коже, а терапевтическая часть проходит с использованием «преимущественной проекции».

Возможные размеры полей во входной плоскости тела пациента – 6–15 см в диаметре, наиболее часто используемые – 11 см при диагностике и 8 см при терапии.

Диагностическая коронарография

При диагностических коронарных исследованиях практически отсутствуют прямые проекции, визуализация проводится преимущественно под краниально-каудальными наклонами трубки и наклонами влево-вправо. Все используемые проекции можно сгруппировать в 4 основные группы и 1 дополнительную:

- краниальный наклон и наклон влево (LAO, CRAN);
- краниальный наклон и наклон вправо (RAO, CRAN);
- каудальный наклон и наклон влево (LAO, CAUD);
- каудальный наклон и наклон вправо (RAO, CAUD);
- остальное (проекции, близкие к фронтальным и боковым, ±5°).

Были проанализированы дозиметрические характеристики порядка 100 коронарных исследований, проводимых в 5 различных рентгенохирургических кабинетах различными бригадами врачей. Для подавляющего большинства диагностических коронарных исследований характерно широкое распределение дозы по поверхности кожи пациента с отсутствием ярко выраженной концентрации на одной из областей. Из 100 рассмотренных случаев только 2 процедуры имели более чем 30% вклад в одну из 4 основных областей в режиме рентгенографии. Для остальных 97 процедур на каждую из областей приходится не более 25% от общей дозы от режима рентгенографии. Область «остальное» включает в себя разовые серии снимков в 3–5 неперекрывающихся положениях, поэтому в данных областях локализация МПДК маловероятна.

Все диагностические коронарные исследования проводятся при преимущественном значении размера поля на приемнике 16 или 17 см в диаметре в зависимости от существующих размеров рабочих полей приемника.

Режим рентгеноскопии не является преимущественным по вкладу в общую дозу, однако ее вклад может достигать от 5 до 35%. При анализе предыдущих данных о более чем 250 коронарных процедурах (эти данные в текущей работе не использовались, т.к. не содержат достаточной информации по геометрическим параметрам) было получено, что примерно 75% от общего значения ПДП приходится на режим рентгенографии и 25% – на режим рентгеноскопии. Литературные данные содержат те же выводы – более 70% ПДП принадлежат режиму рентгенографии [10]. В последнее время признаком хорошей медицинской практики является использование скопии вместо графии, использование функции «задержка последнего кадра» и пр. – все это позволяет снижать дозовую нагрузку на пациента (мощность дозы в режиме скопии на порядок меньше мощности дозы в режиме графии) и со временем должно привести к другому соотношению вкладов в дозу режимов скопии и графии. Однако, с точки зрения геометрии распределения поля излучения, это не вносит каких-либо существенных изменений.

В связи с тем, что информация о положении пучка при скопии не сохраняется, возможности сбора данных для статистически корректной оценки распределения дозы в режиме скопии ограничены. С точки зрения методики проведения процедуры, скопия необходима для правильного позиционирования для серийной съемки; кроме того, часть времени тратится на пункцию, постановку и продвижение катетера к интересующим сосудам серд-

ца. Исходя из этого, предполагаем, что локализация при скопии в одной из рассматриваемых областей будет не большей, чем локализация при графии, т.е. около 25% и с большой долей вероятности не превысит значения в 50%.

Для консервативной оценки МПДК рассмотрим вариант с накоплением в одной области около четверти дозы в режиме рентгенографии и половины дозы в режиме рентгеноскопии. Таким образом, консервативное значение МПДК при диагностических коронарных процедурах составит около 30% от суммарного значения СКД.

Средний размер площади поля на входе в тело пациента при характерных для коронарных ИРЛИ геометрических параметрах составляет около 100 см^2 , коэффициент обратного рассеяния равен 1,4 [11].

Согласно формулам (2) и (3), дозовый коэффициент перехода от измеренного значения ПДП к МПДК для диагностических исследований сосудов сердца равен $K_d = 4,2 \text{ мГр}/(\text{Гр} \cdot \text{см}^2)$. Отношение МПДК к КД составляет 0,42.

Коронарная ангиопластика

Всего было проанализировано порядка 70 лечебных вмешательств на сосудах сердца, проводимых в 5 различных рентгенохирургических кабинетах. Для подавляющего большинства вмешательств характерно наличие ярко выраженной преимущественной проекции, т.е. концентрации дозы на поверхности кожи пациента в одном месте. Из 70 рассмотренных случаев в режиме рентгенографии у 63 процедур в преимущественной проекции были сделаны от 60 до 70% снимков, 1 процедура сопровождалась 90% вкладом (данная процедура была повторной и не требовала ни диагностики состояния сосудов, ни поиска нужной проекции) и 6 процедур не имели четко выделенной преимущественной проекции. Вклад скопии в общую дозу такой же, как и при диагностической коронарографии, и составляет около 25%. Большинство вмешательств проводятся при переменном значении размеров поля на приемнике 12(11) или 16 см в диаметре, нередко встречается несколько серий в начале или конце вмешательства при рабочем поле 30(32) см в диаметре.

Для консервативной оценки МПДК рассмотрим вариант с накоплением в области «преимущественной проекции» 70% дозы как от графии, так и от скопии. Средний размер площади поля на входе в тело пациента составляет $70\text{--}100 \text{ см}^2$, коэффициент обратного рассеяния 1,4 [11]. Таким образом, согласно формулам (2) и (3):

$K_d = 14 \text{ мГр}/\text{Гр} \cdot \text{см}^2$ при среднем диаметре поля при исследовании 11–12 см.

$K_d = 10 \text{ мГр}/\text{Гр} \cdot \text{см}^2$ при среднем диаметре поля при исследовании 16 см.

МПДК будет численно равно КД (с учетом обратного рассеяния).

Исследования сосудов головного мозга и каротидных зон

Данный вид ИРЛИ характеризуется сложностью проведения и возможными превышениями порога детерминированных эффектов в коже. Областью возможного поражения является кожа затылочной части головы [13]. Диагностическая ангиография преимущественно состоит из фронтальных проекций, близких к передне-задней (0, 15–20 CRAN), (10–20 LAO/RAO, 15–30 CRAN), и боковых LAO 90 (85–95) и RAO 90 (85–95). При терапевтических

процедурах положение трубки зависит от локализации патологии, характерно наличие преимущественной проекции. ИРЛИ сосудов головного мозга имеют три явно выраженных неперекрывающихся проекции – фронтальная и две боковых.

Обычные размеры полей во входной плоскости тела пациента: 8–20 см в диаметре. Диагностические процедуры проходят преимущественно на больших полях диаметром около 20 см, при необходимости используется цифровое приближение (меньшие поля). Лечебные процедуры также могут проходить при больших полях с применением увеличения или при преимущественно малых полях. Используемый размер поля зависит от конкретного расположения места интереса (стеноза, аневризмы), разрешающей способности аппарата и методики работы конкретной бригады рентгенохирургов. Вклад рентгеноскопии в общую дозу при терапевтическом исследовании зависит от сложности процедуры, однако не превышает 50% от общей дозы, т.е. он либо меньше, либо сопоставим с вкладом в дозу от режима серийной рентгеносъемки.

Ангиография сосудов головного мозга

Всего было проанализировано порядка 100 диагностических исследований сосудов головного мозга. Исследования проводятся при переменном значении размеров поля на приемнике от 30 до 16 (12) см в диаметре. Для трех разных клиник вклад в ПДП в режимах графии и скопии составил одинаковые средние и медианные значения: около 60% и 40% соответственно. Однако эта зависимость проявляется лишь на большом массиве данных, для каждой отдельной процедуры эти соотношения индивидуальны.

Для большинства рассмотренных процедур вклад в дозу в режиме рентгенографии при фронтальной проекции составлял порядка 60%. Доза в режиме скопии накапливается при продвижении катетера от области пункции (как правило, это катетеризация бедренной артерии) в зону интереса и на позиционирование катетера в нужных для диагностических целей локализациях для проведения серийной рентгеносъемки. Для консервативной оценки МПДК предположим, что все 100% дозы от скопии распределены по тем же проекциям, что и графические снимки, без учета вклада использования скопии для постановки и продвижения катетера в зону интереса на начальной стадии. Таким образом, МПДК при диагностических исследованиях сосудов головного мозга составляет около 60% от СКД (60% от графии и те же 60% от скопии).

Средний диаметр поля облучения при ангиографии сосудов головного мозга лежит в пределах 16–30 см; соответственно, средний размер площади поля на входе в тело пациента составляет $150\text{--}300 \text{ см}^2$. Коэффициент обратного рассеяния при характерных для данного типа процедур параметрах и напряжении в 60–70 кВ будет равен 1,4 [11]. Таким образом, согласно формулам (2) и (3):

$K_d = 5,6 \text{ мГр}/\text{Гр} \cdot \text{см}^2$ при среднем диаметре поля на приемнике 16 см.

$K_d = 3,8 \text{ мГр}/\text{Гр} \cdot \text{см}^2$ при среднем диаметре поля на приемнике 20 см.

$K_d = 2,8 \text{ мГр}/\text{Гр} \cdot \text{см}^2$ при среднем диаметре поля на приемнике 30 см.

Отношение МПДК к КД составит 0,8.

Ангиопластика сосудов головного мозга

Всего было проанализировано около 50 дозиметрических характеристик эмболизаций сосудов головного мозга. Диаметр поля на приемнике часто меняется в ходе процедуры, а средний размер поля лежит в пределах 12–20 см.

Для трех разных клиник вклад в ПДП в режимах графии и скопии составил приблизительно одинаковые средние и медианные значения: 50% для того и другого соответственно. Для большинства рассмотренных процедур вклад в дозу в режиме рентгенографии при фронтальной проекции составлял порядка 70–80%. Вклад проекций в режиме скопии из-за несохранения этих данных в памяти компьютера оценить сложно. Непосредственное наблюдение процедур показывает, что наибольший вклад скопии идет во фронтальных проекциях и в «преимущественной области», где происходит сам процесс лечения. Для консервативной оценки МПДК предположим, что все 100% дозы от скопии получает затылочная часть головы. Соответственно, МПДК при лечебных процедурах на сосуды головного мозга может достигать 90% от СКД (все 50% скопии + 80% от 50% графии).

Средний размер площади поля на входе в тело пациента составляет 150–250 см², коэффициент обратного рассеяния – 1,4. Согласно формулам (2) и (3):

$K_d = 8 \text{ мГр/Гр} \cdot \text{см}^2$ при среднем диаметре поля на приемнике 16 см.

$K_d = 5 \text{ мГр/Гр} \cdot \text{см}^2$ при среднем диаметре поля на приемнике 25 см.

Отношение МПДК к КД составляет 1,2.

Исследования органов брюшной полости и малого таза

Все процедуры в данной области характеризуются схожими параметрами проведения и локализацией облучения. Отличием данных процедур от рассмотренных выше является преимущественное использование полей излучения больших размеров (размер поля на приемнике до 40 см в диаметре) и работа в прямой проекции. Иногда возможно использование косых проекций (LAO/RAO 15–30°), но это случается достаточно редко. Виды исследований, сопровождающиеся сменой боковых проекций и относительно небольшими полями, – процедуры эмболизации миомы матки и пластика подвздошных артерий. В связи с поочередной эмболизацией правых и левых артерий работа может идти на рабочих полях диаметром 20–25 см и наклонных проекциях 15–30° LAO/RAO, однако большинство процедур такого рода сопровождаются перекрытием полей в центральной части. Данная гипотеза была проверена с помощью собственных пленочных измерений [9], а также находит свое подтверждение в литературных данных [13,14]. При ИРЛИ в области брюшной полости и малого таза наибольший вклад в дозу пациента дает не столько режим рентгенографии, сколько режим просвечивания [15]. Возможные размеры полей во входной плоскости тела пациента – 15–26 см в диаметре, а наиболее часто используемый – около 20 см как для диагностики, так и для терапии.

Ввиду использования лишь прямой проекции для большинства процедур в данной области консервативной

оценкой МПДК являются все 100% от СКД. Коэффициент обратного рассеяния при используемых параметрах равен 1,4.

Таким образом, при вычислениях по формулам (2) и (3) получаем:

$K_d = 5,6 \text{ мГр/Гр} \cdot \text{см}^2$ при среднем диаметре поля на приемнике 25 см.

$K_d = 3,5 \text{ мГр/Гр} \cdot \text{см}^2$ при среднем диаметре поля на приемнике 30 см.

Отношение МПДК к КД составляет 1,4.

Обсуждение

Во многих странах используется подход к оценке вероятности возникновения кожных реакций, строящийся на предположении, что вся входная поглощенная доза накапливается в одном участке кожи [13, 14, 16]. В данной работе для рутинного использования были вычислены дозовые коэффициенты перехода к МПДК от наиболее информативной и доступной дозиметрической величины ПДП. Данные коэффициенты тоже были получены путем консервативной оценки, поэтому в некоторых случаях могут существенно завышать значения МПДК, однако они являются более реалистичными, чем оценка по общей величине КД. Также сделана оценка МПДК на основании измерений КД, и этот способ удобнее, т.к. не требует информации о среднем размере поля облучения, при котором проходит процедура, однако не все аппараты отображают данную величину.

К сожалению, и это подтверждено нашим и множеством других исследований [2–4, 9, 12, 17–20], невозможно найти однозначную корреляцию между ПДП или КД и МПДК даже в рамках одного вида исследования. Целью данной работы было не оценить точное значение МПДК, а лишь сделать его оценку более реалистичной для более обоснованных мер по предотвращению тканевых реакций кожи.

В процессе сбора данных для визуализации распределения дозы на поверхности кожи пациента и оценки МПДК для ряда процедур были проведены серии прямых измерений поглощенной дозы в коже с использованием специальных рентгеночувствительных пленок Gafchromic XR-RV3, результаты данной работы опубликованы ранее [9]. В таблице 1 проведено сравнение полученных расчетных данных и данных по реальным измерениям (пленочная дозиметрия, ТЛД) для ИРЛИ сосудов сердца – процедур, наиболее сложных в плане оценки распределения дозы в коже.

По результатам сравнения видно, что коэффициенты перехода, указанные в МУ 2.6.1.2944-11, в основном, ниже полученных в данной работе и опубликованных в результатах других исследований. Для новой редакции МУ 2.6.1.2944-11 были подготовлены обновленные коэффициенты перехода, проект изменений уже опубликован [23].

В таблице 2 представлены отношения МПДК к СКД для основных видов некоронарных исследований, так называемый коэффициент концентрации. Для сравнения взяты литературные данные с результатами прямых из-

Таблица 1

Коэффициенты перехода Kd от измеренного значения ПДП к МПДК для коронарных ИРЛИ

[Table 1]

The conversion coefficient (Kd) from the measured dose area product to the maximum skin dose for the coronary interventional procedures]

Вид исследования [Type of investigation]	Коэффициент перехода Kd, мЗв/(Гр×см²) [Conversion coefficient Kd, mSv/(Gy·cm²)]	Литературный источник [Source]
Сосуды сердца, диагностика [Diagnostic examination of cardiac vessels]	3,5	МУ 2.6.1.2944-11 [MU 2.6.1.29944-11]
	4,2	Наше исследование [This study]
	3,2–4,2	Наше исследование (пленки) [Own film measurements] [9]
	3,8	[21]
	4,3	[22]
	3,9	[4]
	9,6	[19]
	3,1–9,0	[19]
	7	МУ 2.6.1.2944-11 [MU 2.6.1.29944-11]
	10–14	Наше исследование [This study]
Сосуды сердца, терапия [Treatment on the cardiac vessels]	9,1–14,2	Наше исследование (пленки) [Own film measurements] [9]
	8,1	[21]
	8,7	[22]
	9,7	[4]
	14,9	[19]
	8,2–10,9	[19]

Таблица 2

Отношение МПДК к СКД для периферических ИРЛИ

[Table 2]

The ratio of the maximum skin dose (MSD) to the total skin dose (TSD) for the peripheral interventional procedures]

Область исследования [Location of procedure]	Отношение МПДК к СКД [Ratio of MSD to TSD]	Литературный источник [Source]
Сосуды головного мозга и каротидных зон, диагностика [Diagnostic examination of cerebral and carotid vessels]	0,6	Наше исследование [this study]
	0,51–0,61	[5]
	0,59	[24]
Сосуды головного мозга и каротидных зон, терапия [Treatment of cerebral and carotid vessels]	0,9	Наше исследование [this study]
	0,59–0,85	[5]
	1	Наше исследование [this study]
Органы абдоминальной области и малого таза [Examinations in abdominal and pelvic area]	0,78–0,93	[5]
	0,64–0,86	[5]
	0,80–0,94	[5]

мерений [5, 24]. Полученные нами соотношения МПДК к СКД оказались на верхней границе результатов прямых измерений, что отражает концепцию консервативной оценки – не пропустить случаи переоблучения кожи для всех процедур. Однако разброс в результатах прямых измерений (это касается и исследований сосудов сердца) говорит о возможности более точного расчета коэффициентов перехода – не по виду исследования в целом, а отдельно для конкретных процедур с учетом методики их проведения.

На основании статистики распределения геометрических параметров проведения ИРЛИ – размера поля облучения и используемых проекций – были построены предположения о возможной локализации и степени концентрации поглощенной дозы в определенных участках кожи. Для каждого вида исследований были рассчитаны консервативные значения коэффициентов перехода от регистрируемых дозиметрических параметров к МПДК. Значения рассчитаны на основании параметров для ангиографического оборудования с фильтрацией 3–4 мм Al, новое оборудование может иметь более жесткую фильтрацию, и соответственно, для расчетов необходимо будет использовать другое значение коэффициента обратного рассеяния (B).

Полученные в данной работе значения коэффициентов перехода от измеренного значения ПДП к МПДК для

интервенционных исследований и контрольные значения ПДП и КД для предотвращения детерминированных эффектов в коже представлены в таблице 3.

Заключение

В данной работе были рассмотрены закономерности распределения дозы на поверхности кожи пациента при проведении основных видов интервенционных исследований. Представлен алгоритм оценки распределения дозы в коже для каждого типа исследований, вычислен коэффициент концентрации дозы на поверхности кожи пациента. Анализ данных проводили на примере наиболее типичных процедур для каждого вида исследований.

В ходе проведения ИРЛИ дозиметрические данные, такие как суммарные значения ПДП и КД в режиме реального времени, отображаются на экране монитора. Ориентируясь на контрольные значения, представленные в данной работе, оперирующий рентгенохирург может учитывать возможный риск возникновения детерминированных эффектов, меняя условия облучения пациента во время процедуры. В случае же превышения контрольных значений рекомендуется информировать пациента о возможных кожных реакциях и вести 2-недельное наблюдение за состоянием кожи в месте возможного переоблучения с последующим применением, при необходимости, терапевтических мер.

Таблица 3

Значения коэффициентов перехода от измеренного значения ПДП к МПДК для интервенционных исследований и контрольные значения ПДП и КД для предотвращения детерминированных эффектов в коже

[Table 3]

The conversion coefficient (Kd) from the measured dose area product to the maximum skin dose for the interventional procedures and the trigger values of dose area product (DAP) and cumulative dose (CD) to prevent the deterministic effects in the skin

Вид исследования [Type of investigation]	Размер поля на приемнике, см [FOV, cm]	Kd, мГр/(Гр×см²) [Kd, mGy/(Gy·cm²)]	Контрольные значения* [Trigger values*]	
			ПДП, Гр·см² [DAP, Gy·cm²]	КД*, Гр [CD, Gy]
Ангиография сосудов сердца [Coronary angiography]	16–17	4,2	700	7,1
	11–12	14	200	
Ангиопластика сосудов сердца [Coronary angioplasty]	16–17	10	300	3,0
	16	5,6	550	
Ангиография сосудов головного мозга и каротидных зон [Angiography of cerebral and carotid vessels]	20	3,8	800	3,7
	30	2,8	1100	
	16	8	375	
Эмболизация сосудов головного мозга и каротидных зон [Embolization of cerebral and carotid vessels]	25	5	600	2,5
	25	5,6	550	
Интервенционные исследования органов абдоминальной области и малого таза [interventional examinations in abdominal and pelvic area]	30	3,5	850	2,1
	40	2	1500	

* – согласно рекомендациям МКРЗ, соответствуют значению МПДК в 3 Гр [1];

[* – according to ICRP Publications corresponding value of MSD is 3 Gy [1]].

Литература

1. ICRP. Publication 85. Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedures. Ann. ICRP. Vienna, Pergamon Press; 2000. vol. 30, № 2. 68 p.
2. Голиков В.Ю., Сарычева С.С., Балонов М.И., Кальницкий С.А. Оценка доз облучения пациентов при проведении интервенционных рентгенологических исследований // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 3. С. 26-31.
3. Chida K., Kagaya Y., Saito H., et al. Total entrance skin dose: an effective indicator of maximum radiation dose to the skin during percutaneous coronary intervention // American Journal of Roentgenology. 2007. Vol. 189, No 4. P. 224-227.
4. Karambatsakidou A., Tornvall P., Saleh N., et al. Skin dose alarm levels in cardiac angiography procedures: is a single DAP value sufficient? // British Journal of Radiology. 2005. Vol. 78, No 933. P. 803-809.
5. Miller D.L., Balter S., Cole P.E., et al. Radiation doses in interventional radiology procedures: The RAD-IR study: Part II: Skin Dose // J Vasc Interv Radiol. 2003. No 14. P. 977-990.
6. Галстян И.А., Надежина Н.М. Местные лучевые поражения как осложнения медицинского облучения // Мед. радиология и рад. безопасность. 2012. Т. 57, № 5. С. 31-36.
7. Амирасланов, Ю.А., Светухин А.О., Жуков Д.В., и др. Местные лучевые поражения при эндоваскулярных вмешательствах на коронарных артериях // Диагностическая и интервенционная радиология. 2007. Т. 2, № 1. С. 48-54.
8. Balter S., Fletcher D.W., Kuan H.M., et al. Techniques to estimate radiation dose to skin during fluoroscopically guided procedures // J Vasc Interv Radiol. 2001. No 13. P. 391-397.
9. 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.
10. Pitton M.B., Kloeckner R., Schneider J. Radiation exposure in vascular angiographic procedures // J Vasc Interv Radiol. 2012. No 23. P. 1487-1495.
11. ICRU. Publication 74. Patient Dosimetry for X-rays used in medical imaging // Journal of the ICRU. 2005. Vol 5, No 2. 116 p.
12. Rampado O., Ropolo R. Entrances skin dose distribution maps for interventional neuroradiological procedures: a preliminary study // Radiation Protection Dosimetry. 2005. Vol. 117, No 1-3. P. 256-259.
13. Neocleous A., Yakoumakis E., Gialousis G., et al. Dosimetry using Gafchromic XR-RV2 radiochromic films in interventional radiology // Radiation Protection Dosimetry. 2011. Vol. 147, No 1-2. P. 78-82.
14. NCRP Report 168. Radiation dose management for fluoroscopically-guided interventional procedures // National Council on Radiological Protection. 2010. 314 p.
15. McParland B.J. A study of patient radiation doses in interventional radiological procedures // The British Journal of Radiology. 1998. 71. P. 175-185.
16. Rehani M., Srimahachota S. Skin injuries in interventional procedures // Radiation Protection Dosimetry. 2011. Vol. 147, No 1-2. P. 8-12.
17. Chida K., Saito H., Otani H., et al. Relationship between Fluoroscopic Time, Dose-Area Product, Body Weight and Maximum Radiation Skin Dose in Cardiac Interventional Procedures // Am J Roentgenol. 2006. No 186. P. 774-778.
18. D'Ercole L., Mantovani L., Zappoli T.F., et al. A study on Maximum Skin Dose in Cerebral Embolization Procedures // American Journal of Neuroradiology. 2007. No 28. P. 503-507.
19. Patient Dose Optimization in Fluoroscopically Guided Interventional Procedures / TecDoc-1641 // Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010. 95 p.
20. Struelens L., Vanhavere F., Bosmans H., et al. Skin dose measurements on patients for diagnostic and interventional neuroradiology: a multicentre study // Radiation protection dosimetry. 2005. Vol. 114, No 1-3. P. 143-146.
21. Hansson B., Karambatsakidou A. Relationships Between Entrance Skin Dose, Effective Dose and Dose Area Product for Patients in Diagnostic and Interventional Cardiac Procedures // Radiation Protection Dosimetry. 2000. Vol. 90, No 1-2. P. 141-144.
22. Padovani R., Quai E. Patient dosimetry approaches in interventional cardiology and literature dose data review // Radiation Protection Dosimetry. 2005. Vol. 117, No 1-3. P. 217-221.
23. Голиков В.Ю., Чипига Л.А., Водоватов А.В., Сарычева С.С. Дополнения и изменения в оценке эффективных доз внешнего облучения пациентов при медицинских исследованиях // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 3. С. 120-132.
24. Neil S., Padgham C., Martin C.J. A study of the relationship between peak skin dose and cumulative air kerma in interventional neuroradiology and cardiology // J. Radol. Prot. 2010. Vol. 30, No 4. P. 659-672.

Поступила: 20.04.2020 г.

Сарычева Светлана Сергеевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского Научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: Svetlana2003@mail.ru

Для цитирования: Сарычева С.С. Оценка дозовых параметров, определяющих вероятность возникновения детерминированных эффектов в коже пациентов, подвергающихся интервенционным рентгенологическим исследованиям // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 77-86. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-77-86

Evaluation of dose parameters defining the probability of deterministic effects in the skin of patients undergoing interventional radiological examinations

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

The study is devoted to the assessment of dose parameters determine the probability of deterministic effects in the skin for patients undergoing high-dose interventional radiological examinations. Particular attention is paid to the analysis of the geometry of the absorbed dose distribution over the patient's skin for the main types of interventional examinations. The aim of this study was to clarify the methodology for assessment of the maximum absorbed dose in the patients' skin, taking into account new data. The data collection was carried out in nine city hospitals from Sankt-Petersburg; detailed information about more than 400 procedures was obtained. The data about operation technique for the main types of interventional examinations, physical, technical, geometric and dosimetric parameters for each procedure were registered. Based on the statistical data on distribution of geometric procedure parameters (fields size and projections) possible localizations and values of the absorbed dose in certain areas of the patients' skin were determined. An updated methodology for skin dose assessment based on the recorded dosimetric value of dose area product considering the radiation fields size was presented. As an alternative, an estimation of the maximum skin dose based on the cumulative air kerma at the patient's reference point – «representative» point for the patient's skin considering the tube rotation was proposed. This method does not require the information on used field size. The conservative conversion coefficients from the measured dosimetric values to the peak skin dose and trigger values to prevent deterministic effects in the patients' skin were calculated.

Key words: interventional radiology, skin dose, conversion coefficients.

References

1. ICRP. Publication 85. Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedures. Ann. ICRP. Vienna, Pergamon Press; 2000; 30(2): 68.
2. Golikov VYu, Sarycheva SS, Balonov MI, Kalnitsky SA. Estimation of patient exposure under intervention radiological examinations. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(3): 26-31 (In Russian).
3. Chida K, Kagaya Y, Saito H, Takai Y, Takahashi S, Yamada S, et al. Total entrance skin dose: an effective indicator of maximum radiation dose to the skin during percutaneous coronary intervention. *Am J Roentgenol*. 2007;189(4): 224-227.
4. Karambatsakidou A, Tornvall P, Saleh N, Chouliaras T, Lofberg PO, Fransson A. Skin dose alarm levels in cardiac angiography procedures: is a single DAP value sufficient? *Br J Radiol*. 2005;78(933): 803-809.
5. Miller DL, Balter S, Cole PE, et al. Radiation doses in interventional radiology procedures: The RAD-IR study: Part II: Skin Dose. *J Vasc Interv Radiol*. 2003;14: 977-990.
6. Galstyan IA, Nadezhina NM. Local Radiation Injuries as Complications of Medical Radiation Exposure. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2012;57(5): 31-36. (In Russian).
7. Amiraslanov YA, Svetukhin AO, Zhukov DV, Shchepilov DV, Ukhin SA, Maltsev AA. Local radiation injuries gained due to endovascular interventions of coronary arteries. *Diagnosticheskaya i intervensionnaya radiologiya = Diagnostic and Interventional Radiology*. 2007;2(1): 48-54. (In Russian).
8. Balter S, Fletcher DW, Kuan HM, Miller D, Richter D, Seiss H, et al. Techniques to estimate radiation dose to skin during fluoroscopically guided procedures. *J Vasc Interv Radiol*. 2001;13: 391-397.
9. Sarycheva SS. Patients skin dose measurements during interventional radiological examinations using Gafchromic XR-RV3 FILM. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(4): 89-95. (In Russian)
10. Pitton MB, Kloeckner R, Schneider J. Radiation exposure in vascular angiographic procedures. *J Vasc Interv Radiol*. 2012;23: 1487-1495.
11. ICRU. Publication 74. Patient Dosimetry for X-rays used in medical imaging. *Journal of the ICRU*. 2005;5(2): 116.
12. Rampado O, Ropolo R. Entrances skin dose distribution maps for interventional neuroradiological procedures: a preliminary study. *Radiation Protection Dosimetry*. 2005;117(1-3): 256-259.
13. Neocleous A, Yakoumakis E, Gialousis G, Dimitriadis A, Yakoumakis N, Georgiou E. Dosimetry using Gafchromic XR-RV2 radiochromic films in interventional radiology. *Radiation Protection Dosimetry*. 2011;147(1-2): P. 78-82.
14. NCRP Report 168. Radiation dose management for fluoroscopically-guided interventional procedures. *National Council on Radiological Protection*. 2010: 314.
15. McParland BJ. A study of patient radiation doses in interventional radiological procedures. *Br J Radiol*. 1998;71: 175-185.
16. Rehani M, Srimahachota S. Skin injuries in interventional procedures. *Radiation Protection Dosimetry*. 2011; 147(1-2): 8-12.
17. Chida K, Saito H, Otani H, Kohzuki M, Takahashi Sh, Yamada Sh, et al. Relationship between Fluoroscopic Time, Dose-Area Product, Body Weight and Maximum Radiation Skin Dose in Cardiac Interventional Procedures. *Am J Roentgenol*. 2006; 186: 774-778.

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

18. D'Ercole L, Mantovani L, Zappoli TF, Bocchiola M, Azzaretti A, Maria FDi, et al. A study on Maximum Skin Dose in Cerebral Embolization Procedures. *American Journal of Neuroradiology*. 2007;28: 503-507.
19. Patient Dose Optimization in Fluoroscopically Guided Interventional Procedures / TecDoc-1641. Vienna: International Atomic Energy Agency. 2010:95.
20. Struelens L, Vanhavere F, Bosmans H, Van Loon R, Mol H. Skin dose measurements on patients for diagnostic and interventional neuroradiology: a multicentre study. *Radiation Protection Dosimetry*. 2005;114(1-3): 143-146.
21. Hansson B, Karambatsakidou A. Relationships Between Entrance Skin Dose, Effective Dose and Dose Area Product for Patients in Diagnostic and Interventional Cardiac Procedures. *Radiation Protection Dosimetry*. 2000;90(1-2): 141-144.
22. Padovani R, Quai E. Patient dosimetry approaches in interventional cardiology and literature dose data review. *Radiation Protection Dosimetry*. 2005;117(1-3): 217-221.
23. Golikov VYu, Chipiga LA, Vodovatov AV, Sarycheva SS. Supplements and adjustments to the method of the assessment of the effective dose from the external exposure of the patients. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(3): 120-132. (In Russian).
24. Neil S, Padgham C, Martin CJ. A study of the relationship between peak skin dose and cumulative air kerma in interventional neuroradiology and cardiology. *Journal of Radiological Protection*. 2010;30(4): 659-672.

Received: April 20, 2020

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. Evaluation of dose parameters defining the probability of deterministic effects in the skin of patients undergoing interventional radiological examinations. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No 3. P. 77-86. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-77-86.

Обеспечение радиационной безопасности населения восточных районов Оренбургской области при использовании питьевой воды из подземных источников водоснабжения

Т.А. Кормановская¹, И.К. Романович¹, К.А. Сапрыкин¹, Н.Е. Вяльцина², С.В. Гаевой²,
В.Ю. Коновалов³, Л.В. Бондарь³

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

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

³ Центр гигиены и эпидемиологии в Оренбургской области, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Оренбург, Россия

Начиная с 2014 г., в воде подземных источников восточных районов Оренбургской области стали фиксироваться случаи превышения удельной суммарной альфа-активности природных радионуклидов и удельной активности ^{222}Rn . По результатам исследований в ряде населенных пунктов были установлены системы аэрации воды подземных источников перед подачей ее в распределительную сеть, но значительные затраты на техническое обслуживание аэрационных установок привели к перебоям в их функционировании. На основании выполненных исследований питьевой воды в населенных пунктах Адамовского, Кваркенского, Новоорского, Домбаровского, Светлинского районов и Ясенского городского округа было установлено, что в отдельных населенных пунктах удельная активность ^{222}Rn в питьевой воде более чем в 10 раз превышала уровень вмешательства; превышений уровней вмешательства по содержанию в воде ^{226}Ra , ^{224}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po и ^{238}U не было выявлено. По результатам проведенных экспериментов и анализов представлена гигиеническая оценка показателей радиационной безопасности питьевой воды подземных источников водоснабжения ряда населенных пунктов восточных районов Оренбургской области, проведен анализ эффективности работы систем аэрации, разработаны рекомендации по обеспечению радиационной безопасности населения Восточного Оренбуржья при потреблении воды подземных источников, а также представлены предложения по усовершенствованию нормирования содержания ^{222}Rn в питьевой воде.

Ключевые слова: питьевая вода, подземные источники водоснабжения, удельная суммарная альфа- и бета-активность, природные радионуклиды, радон, аэрационная установка.

Введение

Соответствие качества питьевой воды по радиационным показателям требованиям санитарного законодательства (НРБ-99/2009¹, ОСПОРБ 99/2010², СанПиН

2.6.1.2800-10³, СанПиН 2.1.4.1074-01⁴) является важной составляющей обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации. Анализ содержания радионуклидов в питьевой воде, изучение закономерностей

¹ СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) [SanPiN 2.6.1.2523-09 Norms of the radiation safety (NRB 99/2009) (In Russ.)]

² СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010) [SP 2.6.1.2612-10. Basic sanitary rules of provision of the radiation safety (OSPORB 99/2010) (In Russ.)]

³ СанПиН 2.6.1.2800-10. Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения [SanPiN 2.6.1.2800-10. Hygienic requirements on the limitation of the exposure of the public from natural sources of ionizing exposure (In Russ.)]

⁴ СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения [SanPiN 2.1.4.1074-01. Drinking water. Hygienic requirements on the quality of water from the centralized systems of drinking water supply. Quality control. Hygienic requirements on the provision of safety of the hot water supply systems (In Russ.)]

Кормановская Татьяна Анатольевна

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

Адрес для переписки: 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: f4dos@mail.ru

стей их поступления с подземными водами, оценки доз облучения населения за счет потребления питьевой воды занимают значимое место среди исследований факторов радиационной обстановки [1–4], поскольку проблемы повышенного содержания природных радионуклидов в воде подземных источников водоснабжения актуальны для различных регионов России [5–8].

Начиная с 2014 г., в воде подземных источников ряда населенных пунктов Восточного Оренбуржья в ходе мониторинговых исследований, проводимых специалистами ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Оренбургской области», стали фиксироваться случаи превышения критериев первичной оценки качества питьевой воды по показателям радиационной безопасности и удельной активности ^{222}Rn . С расширением исследований на территории восточных районов области выявлялись все новые и новые населенные пункты с повышенным содержанием природных радионуклидов (ПРН) в воде подземных источников. В ходе проведения в 2014–2017 гг. мониторинговых исследований подземных источников водоснабжения по радиационным показателям количество населенных пунктов с повышенным содержанием ПРН в питьевой воде увеличилось до 57.

Причиной увеличения ПРН в подземных водах региона стали, по мнению специалистов гидрометеорологических служб региона [9], тектонические и геологические процессы, происходящие в земной коре. При этом необходимо отметить, что единственным источником водоснабжения для населения этой части Оренбургской области являются подземные источники.

По результатам исследований в соответствии с рекомендациями специалистов Роспотребнадзора, начиная с 2014 г., в ряде населенных пунктов Оренбургской области установлены системы аэрации воды подземных источников перед подачей ее в распределительную сеть. По состоянию на декабрь 2017 г. комплексы очистки питьевой воды различных типов установлены в 21 населенном пункте восточных районов Оренбургской области. Однако значительные затраты на содержание и техническое обслуживание установок аэрации, возложенные на предприятия по очистке воды, привели к тому, что большая часть установок функционировала с перебоями или не функционировала вообще.

Для снижения содержания ^{222}Rn в питьевой воде в населенных пунктах были применены различные типы оборудования:

1. Комплексы очистки на основе установки станции очистки воды СКО «Роса»-СБМ-25,0, в состав которого входят: термоизолированный контейнер с обогревателями в зимнее время, емкости для приема и очистки воды, компрессоры, центробежные насосы и станция управления работой СКО-25. Аналогично функционирует комплекс очистки на основе установки станции очистки воды СКО «Роса»-СБМ-5,0. Вода из комплекса очистки СКО «Роса» может подаваться как в накопительную емкость (башня Рожновского), так и сразу в распределительную сеть.

2. Комплексы очистки на основе водонапорной башни, состоящие из: водонапорной башни сигарообразной формы, компрессоров, дисковых аэраторов в нижнем слое воды в башне, подземного или наземного утепленного отапливаемого помещения для размещения компрессоров и автоматики.

В отдельных крупных населенных пунктах аэраторы установлены не в водонапорных башнях, а в емкостях объемом 500 м³.

При применении всех описанных средств аэрации процесс очистки построен на принципе барботации воды. Принципиально указанные средства аэрации воды подземных источников перед подачей в распределительную сеть можно разделить на 2 типа: установки СКО «Роса» и аэраторы, установленные в нижнем слое воды в водонапорных башнях (емкостях).

Из всех типов установок наименее затратной, по оценкам специалистов ЖКХ, признана эксплуатация комплекса очистки на основе водонапорной башни с подземным размещением компрессоров, поскольку при такой технологии не требовались средства на дополнительный обогрев компрессорной. Тем не менее, на декабрь 2017 г. из-за отсутствия финансирования не функционировали ранее установленные аэрационные установки и аэраторы в ряде населенных пунктов Адамовского района (в п. Аниховка, п. Брацлавка, с. Карабутак, с. Нижняя Кийма, п. Жуламансай и п. Энбекши), Кваркенского района (в п. Аландский и п. Кваркено) и Светлинского района (в п. Актюбинский).

В 2018 г. специалистами ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, Управления Роспотребнадзора по Оренбургской области и ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Оренбургской области» была выполнена научно-исследовательская работа, результатом которой стала адресная программа мероприятий по снижению доз облучения населения отдельных населенных пунктов восточных районов Оренбургской области за счет потребления питьевой воды и экономически обоснованные предложения в Программу «Чистая вода» Оренбургской области по улучшению качества питьевой воды в населенных пунктах восточных районов Оренбургской области [10].

Результаты совместной научно-исследовательской работы ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, Управления Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Оренбургской области и ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Оренбургской области» в 2018 г. были представлены руководителю Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека А.Ю. Поповой и доложены губернатору Оренбургской области Ю.А. Бергу.

По результатам исследований в восточных районах Оренбургской области уже к началу 2019 г. были установлены дополнительные аэраторы.

В 2019 г. в рамках Государственного контракта специалистами ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева и ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Оренбургской области» была выполнена научно-исследовательская работа «Комплексное радиационное обследование и гигиеническая оценка уровней облучения населения восточных районов Оренбургской области за счет использования питьевой воды подземных источников водоснабжения».

Цель исследования – гигиеническая оценка показателей радиационной безопасности питьевой воды подземных источников водоснабжения населенных пунктов восточных районов Оренбургской области, ана-

лиз эффективности проводимых мероприятий по улучшению качества воды, разработка рекомендаций по обеспечению радиационной безопасности населения Восточного Оренбуржья при потреблении воды подземных источников.

Организация, объем и методы исследований

В 2014 г. исследования были проведены в 12 районах и городских округах Оренбургской области (исследованы 392 пробы воды в 201 населенном пункте). На территории северо-восточных районов области – Адамовского, Новоорского и Кваркенского – в 2015 г. был проведен анализ 489 проб воды из подземных источников и распределительной сети на содержание ^{222}Rn и показатели удельной суммарной альфа- и бета-активности, в 2016 г. – анализ 394 проб, в 2017 г. – анализ 395 проб. На территории юго-востока области (г. Орск, г. Новотроицк, Ясененский ГО, Домбаровский и Светлинский районы) в 2015 г. был проведен анализ 191 пробы воды из подземных источников и распределительной сети, в 2016 г. – анализ 144 проб, в 2017 г. – анализ 104 проб на содержание ^{222}Rn и показатели удельной суммарной альфа- и бета-активности. Для определения радионуклидного состава и удельных активностей отдельных радионуклидов в воде подземных источников и распределительной сети некоторых пунктов Адамовского района (п. Аниховка, п. Нижняя Кийма) в 2014 и 2017 гг. был проведен полный анализ радионуклидного состава проб воды с использованием радиохимического метода исследования.

В рамках проведения комплексного обследования населенных пунктов Восточного Оренбуржья в 2019 г. на основании анализа результатов измерений 2014–2017 гг. был сформирован перечень из 37 населенных пунктов Адамовского, Кваркенского, Новоорского, Домбаровского, Светлинского районов и Ясененского ГО, в которых были проведены комплексные исследования радиационных характеристик питьевой воды с определением удельной суммарной альфа- и бета-активности, удельной активности радона и удельных активностей отдельных природных радионуклидов. В данный перечень вошли как населенные пункты, в которых уже проводятся мероприятия по снижению содержания ПРН в воде, так и населенные пункты, в которых до настоящего времени никакие средства не применяются. Еще в 16 населенных пунктах Кваркенского района, 14 населенных пунктах Адамовского района, 6 – Светлинского района, 4 – Ясененского ГО, 5 – Домбаровского района, 13 населенных пунктах Новоорского района (в том числе в населенных пунктах, где ранее либо вообще не проводилось исследований, либо результаты ранее проведенных анализов не выявляли превышений по первичным критериям оценки качества воды и уровню вмешательства по содержанию радона в воде) были проведены исследования удельной суммарной альфа- и бета-активности и удельной активности радона в воде источников подземного водоснабжения. В целом, в рамках выполнения НИР анализы питьевой воды проведены в 95 населенных пунктах Адамовского, Кваркенского, Новоорского, Домбаровского, Светлинского районов и Ясененского ГО, что составляет около 68% от общего числа населенных пунктов в этих районах.

При проведении всех исследований отбор воды в населенных пунктах, где установлены системы аэрации, производился по возможности как из самой скважины (до очистки), так и после аэрационной установки или из распределительной сети (после очистки) для оценки эффективности используемого оборудования. Отбор и анализ проб воды проводился в период с апреля по сентябрь 2019 г., в том числе в летние месяцы, когда водоразбор воды потребителями и нагрузка на системы аэрации воды были максимальными.

Определение удельной суммарной альфа- и бета-активности проводилось из аликвоты пробы массой 1 кг путем упаривания до сухого остатка, активность которого определялась на альфа- и бета-радиометре. Для получения данных по содержанию радионуклидов в питьевой воде и установлению превышений уровней вмешательства по отдельным природным радионуклидам использовались радиохимические методы исследований, включающие в себя стадию концентрирования (выпаривание 10 кг до 1 кг), селективное выделение группы изотопов одного или нескольких элементов, радиохимическую очистку каждого радионуклида и приготовление счетного образца для измерения активности с помощью радиометра и спектрометра. Измерения удельной активности радона в воде проводились по методике, основанной на принципе измерения равновесного содержания радона в воздухе, находящегося в контакте с пробой воды известного объема в герметичной емкости, с дальнейшим расчетом удельной активности радона в воде.

Результаты исследования

1. Определение показателей радиационной безопасности питьевой воды

Исследования 2014 г. выявили повышенное содержание ^{222}Rn в питьевой воде в 14 населенных пунктах Адамовского района, 7 населенных пунктах Домбаровского района, 5 – Светлинского, 5 – Ясененского, 2 – Кувандыкского, 7 – Кваркенского, 2 – Новоорского районов, всего в 42 населенных пунктах 7 территорий области. На территории Адамовского, Новоорского и Кваркенского районов в 2015 г. превышения уровня вмешательства по ^{222}Rn зафиксированы в 189 пробах, превышения удельной суммарной альфа-активности ПРН – в 21 пробе; в 2016 г. – превышения уровня вмешательства по ^{222}Rn зафиксированы в 116 пробах, превышения удельной суммарной альфа-активности ПРН – в 22 пробах; в 2017 г. – превышения уровня вмешательства по ^{222}Rn зафиксированы в 130 пробах, превышения удельной суммарной альфа-активности ПРН – в 30 пробах.

На территории г. Орска, г. Новотроицка, Ясененского ГО, Домбаровского и Светлинского районов в 2015 г. превышения уровня вмешательства по ^{222}Rn зафиксированы в 41 пробе, превышения удельной суммарной альфа-активности ПРН – в 3 пробах; в 2016 г. – превышения уровня вмешательства по ^{222}Rn зафиксированы в 19 пробах; в 2017 г. – превышения уровня вмешательства по ^{222}Rn зафиксированы в 10 пробах.

В таблице 1 представлены наиболее высокие (более 400 Бк/кг) по результатам измерений 2014–2017 гг. данные о содержании ^{222}Rn в воде подземных источников в населенных пунктах восточных районов Оренбургской области.

Таблица 1

Удельная активность (УА) ^{222}Rn в воде подземных источников

[Table 1]

Specific activity (SA) of ^{222}Rn in the water of underground wells

Район [District]	Населенный пункт [Settlement]	УА ^{222}Rn , Бк/кг [^{222}Rn SA, Bq/kg]
Адамовский район [Adamovskiy district]	п. Аниховка, [Anihovka township]	1834
	п. Брацлавка [Bratzlavka township]	621
	с. Карабутак [Karabutak village]	511
	с. Нижняя Кийма [Nizhnyaya Kiyma village]	466
	п. Жуламансай [Zhulamansay township]	447
	п. Энбекши [Enbekshi township]	463
Кваркенский район [Kvarkenskiy district]	п. Аландский [Alandskiy township]	990
	п. Кваркено [Kvarkeno township]	426
	с. Екатериновка [Ekaterinovka village]	1463
Светлинский район [Svetlinskiy district]	п. Кировский [Kirovskiy township]	470
	П. Актюбинский [Aktubinskiy township]	606
Ясненский городской округ [Yasnanskiy city district]	п. Котансу [Kotansu township]	508

Радиохимический анализ проб воды, отобранных в 2019 г. в 37 населенных пунктах (как на скважинах до аэрационных установок, так и в распределительной сети населенных пунктов), не выявил превышений уровней вмешательства по содержанию в воде ^{226}Ra , ^{224}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po и ^{238}U , за исключением пробы воды из частной скважины дома в п. Аниховка Адамовского района, где удельная активность ^{210}Pb с учетом погрешности измерений составляет 0,221 Бк/кг при уровне вмешательства для ^{210}Pb , равном 0,2 Бк/кг. В остальных 68 пробах питьевой воды, отобранной в населенных пунктах Адамовского, Кваркенского, Новоорского, Домбаровского, Светлинского районов и Ясненского ГО, превышений уровней вмешательства по содержанию в воде ^{226}Ra , ^{224}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po и ^{238}U не выявлено.

Для каждой из 69 проб воды, исследованных радиохимическим методом, определялся показатель «сумма отношений измеренных удельных активностей природных радионуклидов к уровням вмешательства для данных радионуклидов» ($\Sigma(A_i / \text{УВ}_i)$). Превышение показателя с учетом неопределенности измерений значения 1 зафиксированы в пробах воды населенных пунктов, представленных в таблице 2.

Полученные данные означают, что мероприятия по снижению содержания в воде ^{226}Ra , ^{224}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po и ^{238}U в указанных населенных пунктах должны проводиться с учетом принципа оптимизации. Ни в одном из обследованных населенных пунктов не получено значения сумм отношений удельной активности радионуклидов ^{226}Ra ,

^{224}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po и ^{238}U к соответствующим уровням вмешательства, превышающего 10, при котором вода считается непригодной для питьевого потребления населением по содержанию данных радионуклидов.

Уровни содержания ^{222}Rn в питьевой воде обследованных населенных пунктов, заметно превышающие значение уровня вмешательства 60 Бк/кг, выявлены в воде подземных источников (без аэрации) во всех обследованных населенных пунктах, кроме п. Айдырлинский, с. Бриент, с. Приморск и п. Красноярский в Кваркенском районе, п. Теренсай и с. Джасай в Адамовском районе и с. Тасбулак в Новоорском районе.

Удельная активность ^{222}Rn в питьевой воде, более чем в 2 раза превышающая уровень вмешательства, была зафиксирована в воде распределительной сети населенных пунктов Кваркенского района (с. Кваркено, п. Кировск, с. Аландское, с. Новооренбург, с. Екатериновка, с. Зеленодольск), Адамовского района (п. Энбекши, с. Брацлавка, п. Жуламансай, с. Андреевка, с. Нижняя Кийма, п. Джарлинский, п. Белополье, п. Нововинницкое, с. Аниховка, п. Адамовка, п. Баймурат), Светлинского района (п. Восточный, п. Актюбинский), Ясненского ГО (п. Комарово, п. Новосельский, с. Котансу, с. Еленовка, г. Ясный), Домбаровского района (п. Домбаровский, с. Караганда, п. Ушкаты).

В отдельных населенных пунктах были получены данные измерений удельной активности ^{222}Rn в воде распределительной сети, более чем в 10 раз превышающие уровень вмешательства по содержанию радона в питьевой воде – 60 Бк/кг (табл. 3).

Сумма отношений удельной активности радионуклидов к уровням вмешательства

Таблица 2

[Table 2]

The sum of ratios of specific activities of radionuclides to the intervention levels

Населенный пункт [Settlement]	Место отбора пробы [Sampling site]	$\Sigma(A_i / YB_i)$ $\Sigma(A_i / IL_i)$
Адамовский район [Adamovskiy district]		
п. Аниховка, [Anihovka township]	Скважина (после водоподготовки) [Water well (after water conditioning)]	1,29 ± 0,17
	Частная скважина, глубина 25 м (водоподготовки нет) [Private well, 25 m depth (no water conditioning)]	2,41 ± 0,26
с. Карабутак [Karabutak village]	Скважина (до водоподготовки) [Water well (before water conditioning)]	0,98 ± 0,14
п. Энбекши [Enbekshi township]	Скважина (после водоподготовки) [Water well (after water conditioning)]	1,40 ± 0,10
Кваркенский район [Kvarkenskiy district]		
п. Кваркено [Kvarkeno township]	Колонка (после водоподготовки) [Water dispenser (after water conditioning)]	1,03 ± 0,14
с. Екатериновка [Ekaterinovka village]	Водоразводящая сеть (после водоподготовки) [Water pipe network (after water conditioning)]	1,00 ± 0,14
Светлинский район [Svetlinskiy district]		
П. Актюбинский [Aktubinskiy township]	Водоразводящая сеть [Water pipe network]	1,02 ± 0,13
Ясененский городской округ [Yasnenskiy city district]		
п. Новосельский [Novoselskiy township]	Частная скважина, глубина 25 м (водоподготовки нет) [Private well, 25 m depth (no water conditioning)]	1,47 ± 0,16

Удельная активность ^{222}Rn в воде распределительной сети
[Table 3]
Specific activity of ^{222}Rn in the water of the distribution facility

Район, населенный пункт [District, settlement]	УА ^{222}Rn , Бк/кг [^{222}Rn SA, Bq/kg]
Кваркенский район, с. Аландское [Kvarkenskiy district, Alandskoye village]	820
Адамовский район, с. Аниховка [Adamovskiy district, Anihovka village]	658
Светлинский район, п. Актюбинский [Svetlinsky district, Aktubiskiy township]	897

В воде частной скважины в п. Аниховка Адамовского района удельная активность ^{222}Rn в воде скважины составила 1605 Бк/кг. Наибольшее содержание радона зафиксировано в питьевой воде п. Лесная Поляна Кваркенского района – 1977 Бк/кг; в поселке отсутствует система центрального водоснабжения, высокие значения удельной активности радона получены по результатам анализа воды частных скважин.

Применение в штатном режиме функционирования систем аэрации воды подземных источников, как правило, давало значимый положительный эффект в части снижения содержания радона перед подачей воды в распределительную сеть. В таблице 4 приведены данные измерений УА ^{222}Rn в воде скважин ряда населенных пунктов, выполненных одновременно до и после водоподготовки.

Значения удельной активности ^{222}Rn в воде скважин (до и после водоподготовки)

Таблица 4

[Table 4]

Values of the specific activity of ^{222}Rn in the water of wells (before and after water conditioning)

Район, населенный пункт [District, settlement]	Дата [date]	УА ^{222}Rn , Бк/кг [^{222}Rn SA, Bq/kg]	
		до водоподготовки [before water conditioning]	после водоподготовки [after water conditioning]
Кваркенский район, п. Кировск [Kvarkenskiy district, Kirovsk township]	11.06.2019	224 ± 28	133 ± 18
Адамовский район, с. Брацлавка [Adamovskiy district, Bratzlavka village]	10.06.2019	290 ± 31	32 ± 6
	24.06.2019	458 ± 52	77 ± 11
	18.06.2019	336 ± 34	58 ± 17
Адамовский район, с. Нижняя Кийма [Adamoskiy district, Nizhniya Kiyma]	10.06.2019	234 ± 29	181 ± 23
	18.06.2019	260 ± 31	140 ± 14
Новоорский район, с. Караганка [Novoorskiy district, Karaganka village]	10.06.2019	163 ± 22	84 ± 13

Однако проведенные в 2019 г. исследования питьевой воды в 95 населенных пунктах Адамовского, Кваркенского, Новоорского, Домбаровского, Светлинского районов и Ясененского ГО в отдельных случаях выявили следующую закономерность: показатели радиационной безопасности воды в скважине до проведения аэрации были ниже, чем аналогичные показатели воды в распределительной сети населенных пунктов. Выявленные факты потребовали проведения дополнительных обследований систем водоснабжения населенных пунктов с целью прояснения ситуации и поиска источников поступления радионуклидов в воду, подаваемую потребителям.

2. Исследование путей и механизмов поступления радионуклидов в воду

Одной из версий более высоких значений содержания радона в питьевой воде в распределительной сети, по сравнению с питьевой водой до очистки, было ее обогащение радионуклидами при прохождении через сами системы аэрации, применяемые в населенных пунктах. Для проведения обследований были выбраны 2 населенных пункта Адамовского района, в которых установлены системы аэрации воды различных типов: п. Нововинническое (оснащен установкой аэрации СКО «Роса»-СБМ-5,0 без водонапорной башни) и п. Джарлинский (установлена водонапорная башня с аэраторами и наземным помещением компрессоров).

Ухудшение радиационных характеристик воды могло объясняться следующими причинами:

- накопление природных радионуклидов на внутренних поверхностях оборудования, соприкасающегося с водой подземных источников, и переход радионуклидов в воду при прохождении через оборудование;
- высокое содержание радона в воздухе, забираемом компрессорами установок для аэрирования воды (поскольку забор воздуха происходит внутри помещения, где установлены установки СКО «Роса» или компрессоры).

С целью установления причин более высокого содержания радона в воде и суммарной альфа-активности воды после очистки по сравнению с водой из скважин до очистки в 2 населенных пунктах Адамовского района (п. Нововинническое, п. Джарлинский) был проведен следующий объем обследований:

1. Поисковая гамма-съемка труб, задвижек и прочего оборудования, соприкасающегося с водой подземного источника, на участке от скважины до установки аэрации воды (вп. Нововинническое – СКО «Роса», вп. Джарлинский – модифицированная башня Рожновского), самой установки аэрации и труб, задвижек и прочего оборудования на доступном участке после установки аэрации воды, а также в смотровом колодце разводящей сети на территории населенного пункта.

2. Измерения мощности амбиентного эквивалента дозы (МАД) гамма-излучения в обнаруженных точках максимумов.

3. Уточнение информации о функционировании станции очистки воды «Роса» и модифицированной башни Рожновского (места забора воздуха для аэрирования воды; места выброса воздушно-радоновой смеси после аэрирования, вентилирование помещений).

4. Определение содержания изотопов радона в помещении станции очистки воды «Роса», помещении компрессорной и иных доступных помещениях башни Рожновского.

5. Определение удельной активности радона в воде из скважины до очистки, сразу после очистки и из разводящей сети.

6. Определение плотности потока радона с поверхности грунта вблизи станции очистки воды «Роса» и помещения компрессорной башни Рожновского.

7. Отбор проб воды из скважины до очистки, сразу после очистки и из разводящей сети для лабораторного определения суммарной альфа- и бета-активности.

В ходе обследования не подтвердились предположения о накоплении радона в помещении установки оборудования: несмотря на высокую плотность потока радона с поверхности почвы вблизи модулей станции очистки воды «Роса» в п. Нововинническое и компрессорной башни Рожновского в п. Джарлинский, проникновения радона из грунта в помещения не происходит вследствие того, что фундаментом модулей является монолитная железобетонная плита толщиной около 15 см. Результаты экспрессных измерений эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона (R_n) и торона (T_n) не выявили повышенных уровней содержания радона в помещениях модулей.

Обследование труб, задвижек и прочего оборудования, соприкасающегося с водой подземного источника, на участке от скважины до установки аэрации воды, самой установки аэрации и труб, задвижек и прочего оборудования на доступном участке после установки аэрации воды, а также в смотровых колодцах разводящей сети на территории населенных пунктов не выявило значительных превышений МАД гамма-излучения, свидетельствующих о накоплении гамма-излучающих радионуклидов (^{226}Ra) на внутренних поверхностях оборудования систем водоснабжения.

Вместе с тем, анализы содержания радона в воде подтвердили наблюдаемую ранее картину: в п. Нововинническое удельная активность радона в воде из скважины (до аэрации) составила 245 Бк/л, на выходе с установки – 22 Бк/л, а в уличной колонке (распределительная сеть поселка) – 221 Бк/л; аналогичные результаты в п. Джарлинский показали 70, 14 и 41 Бк/л соответственно. Полученные данные подтверждают эффективность работы обеих систем аэрации в части снижения содержания радона, однако не объясняют высокое значение удельной активности в воде распределительной сети.

Объяснение сложившейся ситуации оказалось следующим: в целях экономии электроэнергии включение установок аэрации, как правило, происходит накануне приезда специалистов Роспотребнадзора для отбора проб воды; учитывая длину труб распределительной сети поселков, за время включения установок не происходит разбора воды из сети и поступления к потребителю воды, прошедшей аэрацию. Именно поэтому радиационные показатели воды, отобранные из распределительной сети при проведении обследования, совпадали с показателями воды из скважин до аэрации. Отключение станции очистки воды «Роса» обусловлено и еще одной причиной – при ее работе в распределительной сети поселка снижается напор воды, что вызывает неудобство и недовольство потребителей. Таким образом, для обеспечения населения питьевой водой в полном объеме приходится пренебрегать системой аэрации. В подобных случаях необходимо предусмотреть, чтобы характеристики исполь-

зуемых систем очистки воды соответствовали потребностям жителей в воде и обеспечивали население питьевой водой в полном объеме.

3. Обследование оборудования, соприкасающегося с водой подземных источников

С целью оценки степени накопления на внутренних поверхностях оборудования осадка, содержащего природные гамма-излучающие радионуклиды, в 2019 г. в 34 населенных пунктах Адамовского, Кваркенского, Новоорского, Домбаровского, Светлинского районов и Ясненского ГО было выполнено выборочное обследование используемого в системах водоснабжения населения оборудования, соприкасающегося с водой подземных источников водоснабжения. Общий объем выполненных работ составил: 41 обследование скважинного оборудования, 26 обследований оборудования водоразводящей сети населенных пунктов.

В части населенных пунктов (с. Джасай, п. жарлинский, п. Энбекши, с. Андреевка, с. Карабутак Адамовского района, п. Кировский Кваркенского района и др.) системы аэрации воды были установлены относительно недавно – в 2017–2018 гг.; в ряде населенных пунктов, где повышенные уровни содержания радона в воде были выявлены ранее, аэрационные установки установлены с 2014 г. (с. Аниховка, с. Нижняя Кийма, п. Нововинницкое Адамовского района, с. Аландское, с. Кваркено, с. Екатериновка, п. Красноярский, с. Зеленодольск Кваркенского района). С течением времени на внутренних поверхностях оборудования (особенно в местах стыков и изгибов труб, задвижек, вентилях и т.п.) может происходить накопление осадка. При повышенном содержании ПРН в проходящей через оборудование воде вместе с осадком происходит и их оседание на оборудовании, вследствие чего возможно образование производственных отходов с повышенным содержанием ПРН, а в некоторых случаях – даже радиоактивных отходов (РАО). В рамках обследования не ставилась задача определения эффективной удельной активности ПРН в отходах процесса водоподготовки (поскольку такие исследования связаны с неизбежным демонтажом оборудования), оценка возможности образования производственных отходов с повышенным содержанием ПРН производилась по измерениям МАД гамма-излучения на поверхности оборудования.

Разница в значениях МАД гамма-излучения на поверхности давно используемого и нового оборудования была хорошо заметна при проведении детального обследования ревизионного колодца в п. Нововинницкое Адамовского района: МАД гамма-излучения на поверхности новых труб составила 0,12 мкЗв/ч, на поверхности старых труб – 0,17 мкЗв/ч.

По результатам проведенных исследований в отдельных населенных пунктах (табл. 5) зафиксированы высокие значения МАД на поверхности оборудования, соприкасающегося с водой подземных источников (трубы, вентили и т.д.), что свидетельствует об образовании на внутренних поверхностях оборудования отходов с повышенным содержанием природных радионуклидов.

Таблица 5

МАД на поверхности оборудования, соприкасающегося с водой подземных источников

[Table 5]

Ambient dose equivalent rate of the surface of the equipment in contact with water from the underground springs

Район, населенный пункт [District, settlement]	МАД, мкЗв/ч [ADER, $\mu\text{Sv/h}$]
Кваркенский район, с. Кваркено [Kvarkenskiy district, Kvarkeno village]	0,74
Адамовский район, с. Брацлавка [Adamovskiy district, Bratzlavka village]	0,30
Адамовский район, п. Адамовка [Adamovskiy district, Adamovka township]	0,30
Адамовский район, с. Аниховка [Adamovskiy district, Anihovka village]	2,81
Домбаровский район, п. Домбаровский [Dombarovskiy district, Dombarovskiy village]	0,40

Полученные результаты дают основание предполагать, что осадок на внутренних поверхностях оборудования в с. Аниховка Адамовского района может быть отнесен по классификации СанПиН 2.6.1.2800-10 к III категории производственных отходов, содержащих ПРН, обращение с которыми осуществляется в соответствии с требованиями по обращению с низкоактивными радиоактивными отходами.

Рекомендации по улучшению качества питьевой воды в населенных пунктах восточных районов Оренбургской области

Для обеспечения радиационной безопасности населения восточных районов Оренбургской области при потреблении воды подземных источников водоснабжения необходимы следующие мероприятия:

1. Обеспечить условия бесперебойной работы систем аэрации в населенных пунктах Адамовского, Кваркенского, Новоорского, Домбаровского, Светлинского районов и Ясненского ГО, а также предусмотреть, чтобы характеристики используемых систем очистки воды соответствовали потребностям жителей в воде и обеспечивали население питьевой водой в полном объеме.

2. В населенных пунктах, где установлены аэрационные установки (особенно там, где эти установки эксплуатируются наиболее длительное время), необходимо проводить периодический радиационный контроль оборудования установок, соприкасающегося с водой подземных источников (труб, заглушек, вентилях и т.п.), с целью исключения ситуации образования отходов с повышенным содержанием ПРН вследствие оседания осадка на внутренних поверхностях оборудования. Поскольку при образовании отходов с повышенным содержанием ПРН на внутренних поверхностях оборудования их извлечение неизбежно связано с демонтажом оборудования, необходимо по результатам радиационного контроля рассмотреть варианты установки дополнительных сорбирующих фильтров (например, угольных) до входа воды

в аэрационную установку. Периодичность смены загрузки фильтра, определяемая радиационным контролем, должна обеспечивать недопустимость образования III категории производственных отходов с повышенным содержанием ПРН в соответствии с СанПиН 2.6.1.2800-10.

3. При проведении ремонтных работ, связанных с демонтажом оборудования водоподготовки, в населенных пунктах с. Кваркено (Кваркенский район), с. Брацлавка, с. Аниховка, п. Адамовка (Адамовский район) и п. Домбаровский (Домбаровский район) обеспечить радиационное сопровождение работ (проведение радиационного контроля рабочих мест, определение категории отходов в соответствии с СанПиН 2.6.1.2800-10).

4. Необходимо решить проблему обеспечения питьевой водой населения п. Лесная Поляна Кваркенского района. Использование воды частных скважин с высоким содержанием радона ограничить применением в хозяйственных целях вне помещений жилых и общественных зданий. Проблема может быть решена переходом на альтернативный источник водоснабжения (другие скважины), организацией аэрации воды или путем подвоза питьевой воды.

5. В связи с выявлением высокого значения содержания радона в воде частной скважины п. Аниховка Адамовского района рекомендуется проведение разъяснительной работы с населением для ограничения питьевого потребления воды из частных скважин. Использование воды из частных скважин возможно в хозяйственных целях вне помещений, для питьевого водоснабжения рекомендуется использовать воду системы центрального водоснабжения, прошедшую водоподготовку путем аэрации.

6. Результаты определения содержания радона в воде подземных источников водоснабжения в обследованных населенных пунктах Адамовского, Кваркенского, Новоорского, Домбаровского, Светлинского районов и Ясененского ГО, не оснащенных системами аэрации воды, не выявили необходимости установки дополнительного оборудования водоподготовки в части снижения содержания радона. Рекомендуется проведение мониторинговых исследований удельной активности в воде подземных источников населенных пунктов, где были зафиксированы одиночные или незначительные превышения уровня вмешательства по содержанию радона: с. Верхняя Кардаилловка, с. Кульма, п. Майский, п. Белозерский, с. Новопоцок, с. Уртазым (Кваркенский район), с. Елизаветинка, п. Каинсай, п. Новоадамовка (Адамовский район), п. Гостеприимный, п. Казанча, п. Коскуль, п. Озерный (Светлинский район), п. Голубой Факел (Домбаровский район), с. Чиликта (Новоорский район).

Предложения по усовершенствованию системы нормирования показателей радиационной безопасности питьевой воды

В действующей системе оценки качества показателей питьевой воды нормируемым критерием радиационной безопасности является сумма отношений измеренных удельных активностей природных радионуклидов к уровням вмешательства для данных радионуклидов ($\Sigma(A_i / U_{Vi})$). При соблюдении условия $\Sigma(A_i / U_{Vi}) \leq 1$ улучшения радиационных характеристик воды не требуется; при $1 < \Sigma(A_i / U_{Vi}) \leq 10$ мероприятия по улучшению качества

воды проводятся с учетом принципа оптимизации; только при условии $\Sigma(A_i / U_{Vi}) > 10$ вода считается непригодной к использованию. Таким образом, в системе нормирования питьевой воды предусмотрен этап возможной оптимизации ее радиационных характеристик в интервале нормируемого показателя от 1 до 10 без запрета на использование воды. В соответствии с п. 5.3.5 НРБ-99/2009, пп. 5.1.8, 5.1.9 ОСПОРБ 99/2010, пп. 4.3.3, 4.3.4 СанПиН 2.6.1.2800-10, в формуле $\Sigma(A_i / U_{Vi})$ уровни вмешательства для отдельных радионуклидов принимаются по Приложению 2а к НРБ-99/2009. Однако в Приложении 2а к НРБ-99/2009 не устанавливается уровень вмешательства по содержанию в питьевой воде ^{222}Rn . Таким образом, данный радионуклид не должен учитываться при определении суммы отношений измеренных удельных активностей природных радионуклидов к уровням вмешательства для данных радионуклидов. К сожалению, этот момент не является очевидным, что зачастую приводит к ошибочному использованию данных измерений ^{222}Rn в воде в качестве компонента в формуле $\Sigma(A_i / U_{Vi})$; однако такое толкование требований санитарных правил является некорректным.

Фактически, для определения соответствия качества питьевой воды по содержанию ^{222}Rn в настоящее время можно использовать единственный критерий – уровень вмешательства 60 Бк/кг, установленный в п. 5.3.5 НРБ-99/2009 и п. 4.3.5 СанПиН 2.6.1.2800-10. В соответствии с требованиями действующих нормативных документов при удельной активности ^{222}Rn не более 60 Бк/кг питьевая вода пригодна к использованию без ограничений по радиационному фактору, более 60 Бк/кг – вода непригодна для использования. Получается, что в нормировании содержания ^{222}Rn (единственного из всех радионуклидов) отсутствует этап, когда воду с превышением значения уровня вмешательства не более чем в 10 раз можно использовать и при этом проводить мероприятия по улучшению ее радиационных характеристик с учетом принципа оптимизации. Этот вопрос имеет важное практическое значение еще и потому, что большинство случаев несоответствия качества питьевой воды требованиям нормативных документов в Российской Федерации обусловлено как раз содержанием в воде ^{222}Rn , превышающим установленный уровень вмешательства 60 Бк/кг.

В целях выхода из сложившейся ситуации специалисты ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева подготовили предложения по усовершенствованию системы нормирования радиационных показателей питьевой воды и представили их в разрабатываемом проекте НРБ-99/2020 «Нормы радиационной безопасности». В раздел, посвященный вопросам радиационной безопасности питьевой воды, предложено внести следующее:

«Критическим путем облучения людей за счет ^{222}Rn , содержащегося в питьевой воде, является переход радона в воздух помещения и последующее ингаляционное поступление дочерних продуктов радона в организм. Уровень вмешательства для ^{222}Rn в питьевой воде составляет 60 Бк/кг. Определение удельной активности ^{222}Rn в питьевой воде из подземных источников является обязательным.

Если выполняется условие: $60 < A_{\text{Rn}} \leq 600$, где A_{Rn} – удельная активность ^{222}Rn в воде, Бк/кг; то должны осуществляться мероприятия по снижению содержания радионуклидов в воде с учетом принципа оптимизации. При

превышении удельной активности ^{222}Rn в воде значения 600 Бк/кг вода из источника по показателям радиационной безопасности считается непригодной для питьевого водоснабжения населения».

Внесение данных изменений в санитарное законодательство Российской Федерации позволит уравнивать подходы к нормированию показателей радиационной безопасности питьевой воды при содержании в ней ^{222}Rn и любых других природных радионуклидов, а также расставить приоритеты и определить первоочередные шаги при решении задач в обеспечении радиационной безопасности населения регионов Российской Федерации при повышенном содержании ^{222}Rn в воде подземных источников водоснабжения.

Заключение

На основании выполненных исследований радиационных характеристик питьевой воды подземных источников водоснабжения в населенных пунктах Восточного Оренбуржья установлено, что причиной несоответствия показателей питьевой воды требованиям нормативных документов является высокое содержание ^{222}Rn ; по содержанию в воде остальных природных радионуклидов (^{226}Ra , ^{224}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po и ^{238}U) ни в одном из обследованных населенных пунктов не установлено фактов признания воды непригодной для питьевого потребления населением.

Результаты анализов воды до и после водоподготовки в условиях штатного режима эксплуатации аэрационных установок подтвердили эффективность проводимых мероприятий по снижению содержания ^{222}Rn в питьевой воде. Вместе с тем, в отдельных населенных пунктах на поверхности долго используемого оборудования, соприкасающегося с водой подземных источников, зафиксированы значения МАД гамма-излучения, свидетельствующие об образовании на внутренних поверхностях оборудования отходов с повышенным содержанием природных радионуклидов.

По итогам проведенных исследований разработаны адресные рекомендации, направленные на обеспечение радиационной безопасности населения восточных районов Оренбургской области при потреблении питьевой воды подземных источников и обеспечение радиационной безопасности работников при обслуживании систем водоподготовки.

Литература

1. Гончарова Ю.Н., Швыдко Н.С., Кадука А.Н. Исследование сезонной и долгосрочной вариативности удельной активности природных радионуклидов подземных вод // Радиационная гигиена. 2013. Т. 6, № 1. С. 17-23.
2. Стамат И.П., Ступина В.В., Гончарова Ю.Н., Пашкова А.В. Сезонные изменения суммарных показателей и содержания радона в воде артезианских // Гигиенические аспекты обеспечения радиационной безопасности населения на территориях с повышенным уровнем радиации: матер. междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2008. С. 138-140.
3. Гончарова Ю.Н., Басалаева Л.Н., Кадука М.В., и др. Оценка доз внутреннего облучения населения различных регионов Российской Федерации природными и техногенными радионуклидами за счет потребления питьевой воды // Радиационная гигиена. 2010. Т. 3, № 2. С. 39-44.
4. Кадука М.В., Швыдко Н.С., Шутов В.Н., и др. Оценка доз облучения населения Северо-Западного региона России за счет потребления питьевой воды // Радиационная гигиена. 2010. Т. 3, № 1. С. 23-27.
5. Гончарова Ю.Н. Соответствие воды источников питьевого водоснабжения Северо-Западного региона России требованиям радиационной безопасности // Матер. конф. «Гигиенические и медико-профилактические технологии управления рисками здоровью населения». Пермь, 2011. С. 448-451.
6. Пивоварова Е.А., Пивоваров А.А. Радиационно-гигиеническая оценка источников хозяйственно-питьевого водоснабжения населения на территории Республики Хакасия // Радиационная гигиена. 2016. Т. 9, № 3. С. 61-68.
7. Салдан И.П., Баландович Б.А., Поцелуев Н.Ю. Гигиеническая оценка удельной активности природных радионуклидов в воде источников питьевого водоснабжения // Здоровье населения и среда обитания. 2015. № 10. С. 29-34.
8. Горбанев С.А., Еремина Л.А., Стамат И.П. Радиационно-гигиеническая оценка питьевой воды на территории Ленинградской области // Санитарный врач. 2012. № 8. С. 55-58.
9. АО «Компания ватермиро». Письмо № 06/39 от 19.07.2019 г. «О гидрогеологической характеристике Восточного Оренбуржья».
10. Романович И.К., Стамат И.П., Кормановская Т.А., и др. Природные источники ионизирующего излучения: дозы облучения, радиационные риски, профилактические мероприятия; под ред. акад. РАН Онищенко Г.Г. и проф. Поповой А.Ю. СПб.: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2018. 432 с.

Поступила: 08.06.2020 г.

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

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

Сапрыкин Кирилл Александрович – заведующий лабораторией дозиметрии природных источников, 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

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

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

Коновалов Владимир Юрьевич – главный врач Центра гигиены и эпидемиологии в Оренбургской области Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Оренбург, Россия

Бондарь Леонид Владимирович – заведующий отделением радиационной гигиены Центра гигиены и эпидемиологии в Оренбургской области Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Оренбург, Россия

Для цитирования: Кормановская Т.А., Романович И.К., Сапрыкин К.А., Вяльцина Н.Е., Гаевой С.В., Коновалов В.Ю., Бондарь Л.В. Обеспечение радиационной безопасности населения восточных районов Оренбургской области при использовании питьевой воды подземных источников водоснабжения // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 87–97. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-87-97

Provision of the radiation safety of the public of the eastern districts of the Orenburg region for the use of the drinking water from the underground water supply sources

Tatyana A. Kormanovskaya¹, Ivan K. Romanovich¹, Kirill A. Saprykin¹, Natalya E. Vyaltina², Sergey V. Gaevo², Vladimir Yu. Konovalov³, Leonid V. Bondar³

¹ 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

² Directorate of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Orenburg, Russia

³ Center of the Hygiene and Epidemiology in the Orenburg region, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Orenburg, Russia

Starting from 2014, several cases of exceedance of the specific total alpha-activity of the natural radionuclides and specific activity of ^{222}Rn were identified in the water of the underground wells in the eastern districts of the Orenburg region. Based on the results of the surveys, a number of settlements were equipped with the systems of aeration of water from underground wells prior to the distribution, but significant expenditures on the technical maintenance of the aeration units lead to their frequent malfunctions. Based on the results of the surveys of the drinking water in settlements of the Adamovskiy, Kvarkenskiy, Novoorkskiy, Dombarovskiy, Svetlinskiy districts and Yasnenskiy urban district, it was estimated that in some settlements specific activity of ^{222}Rn in drinking water exceeded the intervention levels up to a factor of 10. No exceedances of intervention levels for ^{226}Ra , ^{224}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po and ^{238}U were identified. Based on the results of experiments and analyses the authors performed the hygienic assessment of the indicators of the radiation safety of the drinking water from the underground water supply sources in several settlements in the eastern districts of the Orenburg region, performed the analysis of the effectiveness of the aeration systems, developed recommendations on the provision of the radiation safety of the public of the eastern parts of the Orenburg region for the use of the drinking water from the underground water supply sources and developed proposals on the improvement of the limitation of concentration of ^{222}Ra in drinking water.

Key words: drinking water, underground sources of water supply, total alpha- and beta specific activity, natural radionuclides, radon, aeration unit.

References

1. Goncharova YuN, Shvydko NS, Kaduka A.N. Investigation of season and long-term variations of natural radionuclides specific activity in underground water. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2013;6(1):17-23. (In Russian)
2. Stamat IP, Stupina VV, Goncharova YuN, Pashkova AV. Seasonal fluctuations in the summary indicators and radon concentration in the water of artesian wells. Proceedings of the international scientific-practical conference «Hygienic aspects of provision of the radiation safety of the population on the territories with increased levels of radiation». St.-Petersburg, 2008: 138-140. (In Russian)
3. Goncharova YuN, Basalaeva LN, Kaduka MV, Shvydko NS, Kaduka AN. Estimation of the population exposure doses from natural and artificial radionuclides due to drinking-water

Tatyana A. Kormanovskaya

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

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

- consumption for the inhabitants of different areas of Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2010;3(2): 39-44. (In Russian)
4. Kaduka MV, Shvydko NS, Shutov VN, Basalaeva LN, Goncharova YuN, Salazkina NV, et al. Estimation of the population exposure doses from drinking-water consumption for the inhabitants of north-eastern area of Russia. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2010;3(1): 23-27. (In Russian)
 5. Goncharova YuN. Compliance of the water from the drinking water supply wells of the North-West region of Russia to the requirements of the radiation safety. Proceedings of the conference "Hygienic and medical-prophylactic technologies of the public health risk management". Perm, 2011: 448-451. (In Russian)
 6. Pivovarov EA, Pivovarov AA. The Radiological Hygienic Assessment of the Sources of Utility and Drinking Water Supply for the Population of Khakasia Republic. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2016;9(3): 61-68. (In Russian)
 7. Saldan IP, Balandovich BA, Potseluev NYu. Hygienic assessment of specific activity of natural radionuclides in the water from the drinking water supply wells. *Zdorovie naseleniya i sreda obitaniya = Health of the population and environment*. 2015;10: 29-34. (In Russian)
 8. Gorbanev SA, Eremina LA, Stamat IP. Radiation-hygienic assessment of the water in the Leningrad region. *Sanitarnyy vrach = Sanitary doctor*. 2012;8: 55-58. (In Russian)
 9. AO "Watermiro company" Letter № 06/39, 19.07.2019. "On the hydrogeological status of the Eastern part of the Orenburg region". (In Russian)
 10. Romanovich IK, Stamat IP, Kormanovskaya TA, Kononenko DV, Balabina TA, Bashketova NS, et al. Natural sources of ionizing radiation: radiation doses, radiation risks, preventive measures. Ed. by Acad. of the RAS Onischenko GG and Prof. Popova AYU. Saint-Petersburg: NIIRG after Professor P.V. Ramzaev; 2018: 432. (In Russian).

Received: June 08, 2020

For correspondence: 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 (Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: f4dos@mail.ru)

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

Kirill A. Saprykin – Acting head of the laboratory of the natural sources dosimetry, 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

Natalya E. Vyaltsina – Head of the Directorate of the Federal service of surveillance on the consumer rights protection and human well-being in the Orenburg region, Chief sanitary doctor of the Orenburg region, Orenburg, Russia

Sergey V. Gaevoy – Head of the department of the surveillance on transport, working conditions and radiation hygiene, Directorate of the Federal service of surveillance on the consumer rights protection and human well-being in the Orenburg region, Orenburg, Russia

Vladimir Yu. Kononov – Chief physician of the Center of hygiene and epidemiology in the Orenburg region, Federal service of surveillance on the consumer rights protection and human well-being, Orenburg, Russia

Leonid V. Bondar – Head of the radiation hygiene department of the Center of hygiene and epidemiology in the Orenburg region, Federal service of surveillance on the consumer rights protection and human well-being, Orenburg, Russia

For citation: Kormanovskaya T.A., Romanovich I.K., Saprykin K.A., Vyaltsina N.E., Gaevoy S.V., Kononov V.Yu., Bondar L.V. Provision of the radiation safety of the public of the eastern districts of the Orenburg region for the use of the drinking water from the underground water supply sources. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No 3, P. 87-97. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-87-97.

Дозы внутреннего облучения у населения префектуры Фукусима вследствие аварии на АЭС Фукусима–Дайичи

И.А. Звонова

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

Статья посвящена анализу результатов дозиметрии внутреннего облучения жителей префектуры Фукусима вследствие аварии на АЭС Фукусима–Дайичи. 24–30.03.2011 г. были проведены скрининговые исследования содержания ^{131}I в щитовидной железе детей в тех муниципалитетах, где японская программа оценки радиологических последствий аварии «SPEEDI» предсказывала дозы в щитовидной железе детей 1 года от 100 до 500 мЗв. Среди 1080 измерений детей 55% были ниже фона, а максимальная оценка эквивалентной дозы в щитовидной железе составила 43 мЗв. Измерения нескольких десятков жителей другими приборами и методами подтвердили низкие уровни содержания ^{131}I в щитовидной железе. Всего массив прямых измерений ^{131}I в щитовидной железе жителей Фукусимы составляет примерно 1300 человек. В пяти обследованных муниципалитетах 75% квартиль распределений индивидуальных доз в щитовидной железе был ниже 10 мЗв, медиана — от 0 до 3,7 мЗв среди детей в возрасте от 0 до 15 лет. Вклад короткоживущих радионуклидов йода оценивается в пределах 15% дозы от ^{131}I для основного радиоактивного выброса 15 марта. Эффективная доза внутреннего облучения, оцененная по 10 тысячам измерений содержания радионуклидов цезия (^{134}Cs + ^{137}Cs) во всем теле за первый год после аварии оказалась ниже 0,1 мЗв у 90% обследованных. Измерения всего тела детей 6–15 лет за второй год после аварии подтвердили значения эффективной дозы внутреннего облучения меньше 0,1 мЗв, в то же время оценки эффективной дозы внешнего облучения с помощью индивидуальных дозиметров у тех же детей определили медиану распределения 0,66 мЗв с максимальной оценкой эффективной дозы 3,45 мЗв. Результаты проведенных измерений не дают оснований ожидать в будущем повышения заболеваемости раком щитовидной железы и другими радиогенными заболеваниями среди жителей Фукусимы. Превентивная эвакуация населения до начала радиоактивных выбросов в атмосферу, пребывание в закрытых помещениях, строгий радиационный контроль продуктов существенно снизили ожидаемые дозы внутреннего облучения жителей. В прогнозах радиологических последствий аварии необходимо учитывать реально выполненные меры защиты населения, местные особенности уклада жизни и проживания.

Ключевые слова: авария на АЭС Фукусима–Дайичи, радиологические последствия, население, дозы внутреннего облучения, щитовидная железа, радионуклиды йода и цезия.

Введение

11 марта 2011 г. землетрясение и мощнейшее цунами обрушилось на тихоокеанское побережье Японии. Они вызвали повреждение трех блоков прибрежной атомной электростанции Фукусима Дайичи (Fukushima Daiichi) (ФДАЭС), что привело к масштабной радиационной аварии с выбросом в окружающую среду радиоактивных веществ в количестве, сравнимом с выбросами при Чернобыльской аварии.

Уже в 2011 г. появились первые результаты мониторинга радиационной обстановки на территории Японии, на основе чего появились первые обобщения радиологических последствий с «предварительными» оценками доз облучения японского населения и прогнозом воз-

можных медицинских последствий [1–4]. В 2012 г. была также издана монография Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены им. профессора П.В. Рамзаева, где, в числе многих тем, были представлены оценки доз внешнего и внутреннего аварийного облучения японского населения, рассчитанные на основе моделей, разработанных по материалам Чернобыльской аварии, и данных мониторинга радиационной обстановки на территории Японии, представленных в Интернете и открытой печати в 2011 г. [5].

Сравнение двух крупнейших аварий в атомной энергетике по масштабам радиоактивных выбросов, по уровням повышения гамма-фона, по количеству эвакуированных жителей вызвала у населения ожидание таких же меди-

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

цинских последствий, как после Чернобыльской аварии [6–9] или как после атомных бомбардировок в 1945 г. в Японии [10, 11]. В первую очередь, люди опасались возрастания заболеваний раком щитовидной железы (ЩЖ) среди детей вследствие внутреннего облучения радиоизотопами йода, что было признано единственным достоверным результатом облучения населения вследствие аварии на Чернобыльской АЭС.

В 20-х числах марта 2011 г. на сайте Комиссии по ядерной безопасности Японии (Nuclear Safety Commission of Japan) был размещен прогноз развития радиационной обстановки и радиологических последствий аварии, сделанный с помощью «Системы прогнозирования информации об аварийных дозах в окружающей среде (SPEEDI)». Согласно SPEEDI, эквивалентные дозы в ЩЖ ребёнка 1 года в зоне эвакуации и на северо-западном радиоактивном следе оценивались величиной от 100 до 1000 мЗв [12]. Сценарий расчета доз предполагал равномерное ингаляционное поступление радионуклидов при нахождении ребёнка 24 ч в сутки на открытом воздухе с 12 по 23 марта (рис. 1). Карта изолиний доз в ЩЖ неоднократно цитировалась в научных публикациях, являясь основанием для проведения подробных исследований и измерений жителей [13–15].

Опубликованная информация вызвала сильное беспокойство среди населения, на которое местные власти отреагировали проведением скрининговых измерений содержания ^{131}I в ЩЖ детей префектуры Фукусима. С 24 по 30 марта 2011 г. было сделано 1149 измерений детей в возрасте от 0 до 15 лет из нескольких населенных пунктов за пределами 30-километровой зоны вокруг АЭС [13, 14], но находящихся на следе радиоактивных выпадений. Кроме того, ещё в двух работах были опубликованы результаты нескольких десятков измерений ЩЖ эвакуированных жителей префектуры Фукусима, выполненные на других приборах, другими методами [15, 16]. Суммарно было измерено содержание ^{131}I в ЩЖ около 1300 жителей, преимущественно детей. На этом скрининг ^{131}I в ЩЖ жителей был остановлен администрацией префектуры. Все оценки доз в ЩЖ детей по измерениям, выполненным разными методами, показали значительно меньшие значения, чем в прогнозе SPEEDI. После Чернобыля в трех республиках бывшего СССР было проведено около 400 тысяч измерений ЩЖ у жителей загрязненных территорий.

Несмотря на успокаивающие результаты скрининга ЩЖ, беспокойство населения относительно последствий облучения детей не уменьшилось. Правительство Японии совместно с администрацией Фукусимы организовало долгосрочную программу скрининга состояния здоровья облученных жителей, в рамках которой уже в 2011 г. начались ультразвуковые исследования ЩЖ детей и подростков, проживавших в зонах радиоактивных выпадений в префектуре Фукусима. Ставилась задача провести обследование всех 360 тысяч детей и подростков до 18 лет на момент аварии в префектуре Фукусима, чтобы иметь «золотой стандарт» для последующих наблюдений за заболеваемостью раком ЩЖ лиц, которые были детьми в период аварии. За первый период с 2011 по 2013 г. было обследовано 81,7% общего количества детей [17]. Ультразвуковые исследования и биопсия подозрительных узловых образований выявили 116

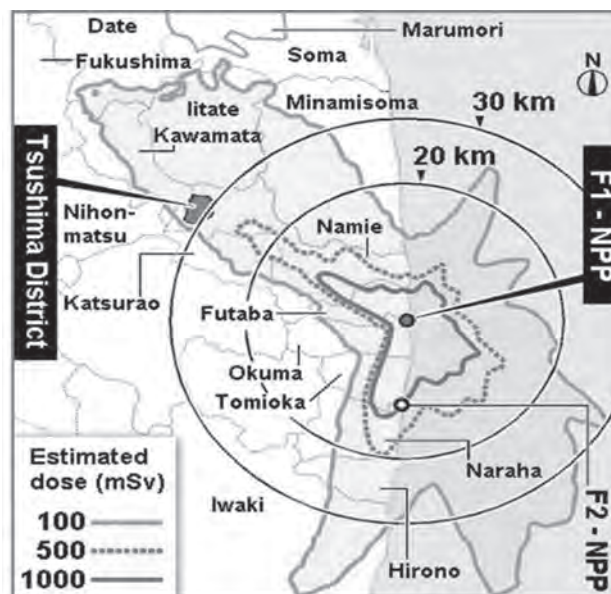


Рис. 1. Прогноз SPEEDI (Система прогнозирования аварийной дозы в окружающей среде) эквивалентных доз в ЩЖ детей в возрасте 1 года на территориях вокруг ФДАЭС [13–15]
[Fig. 1. “SPEEDI” (System for Prediction of Environmental Emergency Dose) prognosis of equivalent dose in thyroids of one-year children in the areas around FDNPP [13–15]]

доброкачественных и злокачественных новообразований среди детского населения префектуры Фукусима. Население восприняло результаты исследования как подтверждение радиационного воздействия аварии и требовало проведения тщательного расследования и оценок доз облучения детей и взрослых, полученных в результате аварии.

Опасения жителей вызывало также внутреннее облучение радионуклидами ^{134}Cs и ^{137}Cs , так как в результате Чернобыльской аварии, начиная со второго года, примерно 40% эффективной дозы населения формировалось за счет поступления в организм радионуклидов цезия [18]. Хроническое внутреннее облучение дополнительно к внешнему облучению в местах проживания является фактором добавочного аварийного облучения, которое необходимо было изучить и оценить.

В настоящей работе представлен анализ результатов дозиметрии внутреннего облучения жителей префектуры Фукусима, проживавших в наиболее загрязненных районах префектуры, в первую очередь за счёт облучения ЩЖ радиоизотопами йода, а также из-за хронического поступления долгоживущих радиоизотопов цезия в организм жителей.

Радиационная опасность биологически доступных продуктов распада ядерного топлива

Во время аварии ядерного реактора наиболее опасными для человека являются радионуклиды, которые при поступлении в организм включаются в обменные процессы, накапливаются в определенных органах и тканях, облучая их при радиоактивном распаде радионуклидов. Такими биологически доступными и наиболее опасными в атмосферных выбросах поврежденного реактора являются радиоизотопы йода и цезия. Согласно обобщениям НКДАР ООН 2013 г. [3], в атмосферу при аварии на

ФДАЭС было выброшено 124 ПБк (10^{15}) ^{131}I ; 10 ПБк ^{133}I ; 29 ПБк ^{132}I (в равновесии с ^{132}Te); 9 ПБк ^{137}Cs ; 9,0 ПБк ^{134}Cs [3]. Наиболее опасными для человека являются радионуклиды: ^{131}I с периодом полураспада $T_{1/2} = 8,04$ суток из-за огромных количеств активности, наработанных во время работы реактора и их биологической доступности, а также ^{137}Cs – $T_{1/2} = 30$ лет и ^{134}Cs – $T_{1/2} = 2,4$ года, которые также в больших количествах накапливаются в реакторах, мигрируют по биологическим цепочкам: атмосфера – выпадения – растительность – молочный скот – молоко и мясо животных – человек.

Радиоизотопы йода и цезия одинаково хорошо проникают в организм человека с вдыхаемым воздухом и с пищевыми продуктами, всасываются в кровь, где пути их расходятся: 15–40% радиоизотопов йода (в зависимости от содержания стабильного йода в рационе [19, 20]) захватываются щитовидной железой, где они включаются в белковые молекулы тиреоглобулинов, откуда медленно секретируются в кровоток, обеспечивая потребность организма в тиреоидных гормонах. Остальное количество радиоизотопов йода выводится из организма, в основном, через почки. Скорость секреции йода из ЩЖ определяется биологическим периодом полувыведения T_6 , который для новорожденных определяется как 11 суток, увеличиваясь с возрастом до 80–90 суток у взрослых людей [21]. Эффективный период уменьшения радиоактивного йода в ЩЖ, $T_{\text{эф}}$, зависит от биологического выведения и от радиоактивного распада:

$$T_{\text{эф}} = \frac{T_6 \cdot T_{1/2}}{T_6 + T_{1/2}}, \quad (1)$$

где: T_6 – биологический период полувыведения;

$T_{1/2}$ – период полураспада радиоизотопа.

Все параметры должны использоваться в одинаковых единицах измерения.

Цезий – это элемент 1-й группы, в организме человека он ведет себя аналогично калию: из кровотока радионуклиды цезия распространяются по всему организму, с несколько большей концентрацией накапливаясь в мышцах. У взрослых старше 17 лет 10% поступившего радионуклида ^{137}Cs быстро выводится из организма с биологическим полупериодом 2 сут, остальные 90% радионуклидов выводятся с полупериодом 110 сут. У детей в возрасте до 1 года выведение происходит с одной скоростью 13–16 сут, у более старших детей выведение цезия из организма происходит с двумя скоростями: например, у детей 5 лет вклады и полупериоды выведения оценены как 45% со скоростью 9,1 сут; 55% – 30 сут, у более старших детей пропорции и скорости выведения сдвигаются в сторону значений для взрослых [21].

Стоит напомнить, что радионуклиды йода концентрируются в ЩЖ, масса которой у взрослых людей около 20 г, а у детей ещё меньше (у новорожденных – 1,3 г), а цезий распределяется по всему телу, из-за этого концентрация радионуклидов, а следовательно, и доза (энергия распада радионуклидов, выделенная в единице массы органа) в ЩЖ оказывается на порядки выше в случае поступления в организм одинаковых количеств радионуклидов. Из такого краткого рассмотрения свойств аварийных радионуклидов становится ясно, почему наибольшее беспокойство вызывает облучение ЩЖ радионуклидами йода.

Мониторинг радиоизотопов йода в щитовидной железе

Внутреннее облучение жителей загрязненных радиоактивными выпадениями территорий происходило в результате ингаляционного поступления во время прохождения радиоактивного облака, потребления загрязненных продуктов питания и воды. Оценка дозы в ЩЖ по результатам измерений содержания ^{131}I в ЩЖ является наиболее достоверным способом оценки дозы в ЩЖ. Прямые измерения содержания ^{131}I в ЩЖ обобщают в себе все особенности поступления радиоизотопов йода в организм конкретного человека, отражая экологические аспекты загрязнения окружающей среды (воздуха, воды и пищевых продуктов) и принятые меры защиты (изоляция в закрытом помещении, эвакуация, отказ от потребления загрязненных продуктов и пр). Однако для достоверной оценки дозы необходимо корректно восстановить динамику поступления радиоизотопов йода в организм человека до момента измерения, что является весьма непростой задачей.

С 24 по 30 марта было выполнено 1149 измерений детей в возрасте от 0 до 15 лет из муниципалитетов Кавамата (Kawamata), Иваки (Iwaki) и Иитате (Iitate), которые расположены за пределами 30-километровой зоны вокруг АЭС, где не было обязательной эвакуации в первые дни после аварии, но где, согласно расчётам SPEEDI, дозы в ЩЖ детей 1 года могли превышать 100 мЗв [13, 14]. После отбраковки измерений, выполненных в условиях повышенного фона и с ошибками записей, в работе осталось 1080 измерений.

Измерения проводились с использованием радиометра на основе сцинтилляционного кристалла NaI(Tl) Ø2,54 × 2,54 см (TCS-16, TCS-171, TCS-172, Hitachi-Aloka Medical, Ltd., Japan) [13, 14]. Измерения мощности дозы проводились в положении детектора перпендикулярно, вплотную к передней поверхности шеи обследуемого, в той же геометрии, как выполнялись измерения в Российской Федерации аналогичным радиометром СРП-68-01 после аварии на ЧАЭС. В качестве фона измерялась мощность дозы при установке детектора к середине плеча того же человека. Для калибровки измерений ^{131}I в ЩЖ использовались фантомы шеи и ЩЖ промышленного производства, в фантом ЩЖ заливался стандартный раствор ^{133}Ba (период полураспада 10,51 лет), имитирующий излучение ^{131}I , в объеме, соответствующем массе ЩЖ у детей разного возраста и взрослых [13]. Распределение измерений в виде «чистой» мощности дозы, измеренной над ЩЖ с вычитанием фона, показано на рисунке 2.

55% измерений оказалось ниже фона, а максимальное измеренное значение над фоном у ребенка одного года было около 0,1 мкЗв/ч, что соответствовало дозе в ЩЖ 43 мЗв, рассчитанной по сценарию SPEEDI.

Поскольку выполненные 1080 измерений ^{131}I в ЩЖ являются единственным массивом прямых измерений, которые могут быть использованы для верификации других модельных методов оценки доз облучения ЩЖ радиоизотопами йода, в последующие годы большие усилия были приложены к уточнению методики расчета активности и дозы в ЩЖ по результатам измерения мощности дозы над ЩЖ [22, 23].

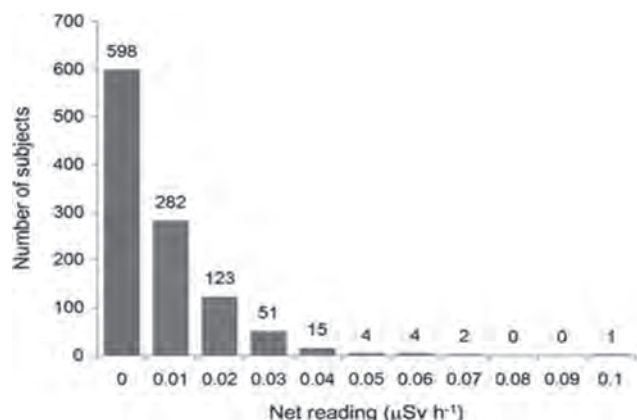


Рис. 2. Распределение измерений 1080 детей по результатам скрининга жителей, пострадавших от аварии на ФДАЭС [14, 22]

[Fig. 2. Results of measuring 1080 persons by the thyroid screening surveys, reported by the medical group of the Support Team for Residents affected by Nuclear Incidents [14, 22]]

Работы продолжились в направлении уточнения возрастных коэффициентов калибровки, верификации путей поступления радионуклидов в организм человека с вдыхаемым воздухом, пищей и водой, а также в направлении поиска корреляций выпадений ^{131}I с другими долгоживущими радионуклидами и разработки методов экологического моделирования [22, 23].

В результате выполненных работ были уточнены детали методики проведенных измерений, более точно определены коэффициенты пересчета измеренной мощности дозы в активность ^{131}I в ЩЖ, изменена модель поступления радиойода в организм: вместо хронического однородного ингаляционного поступления с 12 марта до дня измерений была принята модель однократного ингаляционного поступления 15 апреля – дня максимальных

выбросов в атмосферу. Также была опробована модель пищевого поступления радионуклидов в организм, обоснованная тем, что в продуктах местного производства и водопроводной воде в ряде населенных пунктов префектуры Фукусима измерения в марте 2011 г. показали наличие ^{131}I [23]. Запрет на потребление загрязненных продуктов был введен в 20-х числах марта 2011 г., что предполагает, что часть жителей могла использовать в пищу загрязненные продукты и воду. Исходя из этих измерений, для расчёта дозы в ЩЖ по результатам измерений использовался сценарий равномерного поступления ^{131}I с продуктами и водой, начиная с 16 мая до даты измерения. Предполагалось, что реальная доза находится в интервале между двумя расчётными значениями. В среднем дозы, рассчитанные по сценарию пищевого поступления, составили 0,4 часть от расчета по сценарию однократной ингаляции.

Полученные методические и модельные поправки не внесли существенных изменений в оценки дозы в ЩЖ у детей префектуры Фукусима. Оценки доз несколько возросли по сравнению с первыми значениями 2011 г. [13], например, максимальная оценка дозы изменилась с 43 на 65 мЗв [23], но осталась главная проблема, которая состояла в том, что счетная статистика проведенных измерений была очень низкая по сравнению с фоном. Более половины результатов измерений ЩЖ оказалась на уровне и ниже измерений фона (см. рис. 2), из-за чего оценка среднего значения и медианы распределения содержания ^{131}I в ЩЖ или «измеренных» доз часто попадали в диапазон нулевых измерений, поэтому в качестве основных статистических параметров использовались оценки не среднего значения и медианы, а верхний квартиль, 90% и 95% перцентили распределений [22, 23]. В таблице 1 показаны статистические параметры распределения эквивалентных доз в ЩЖ детей от 0 до 15 лет в некоторых муниципалитетах префектуры Фукусимы, рассчитанные по измерениям в марте 2011 г. по сценарию однократного ингаляционного поступления.

Таблица 1

Статистические параметры распределений эквивалентных доз в ЩЖ детей в возрасте от 0 до 15 лет вследствие поступления ^{131}I (мЗв), рассчитанные по сценарию однократного ингаляционного поступления [23]

[Table 1

Fundamental statistics of thyroid equivalent doses (mSv) due to ^{131}I intake for children aged from 0 to 15 years in some municipalities of the Fukushima prefecture estimated on scenario 1- single inhalation intake [23]]

Населенный пункт [Locality]	Число измерений [Number of measurements]	Медиана, мЗв [Median, mSv]	Верхний квартиль, мЗв [75% percentile, mSv]	Максимум, мЗв [Maximum, mSv]
Кавамата [Kawamata Town]	593	0,0	3,7	31,2
Иваки [Iwaki City]	123	2,8	8,8	47,5
Иитате [Iitate Village]	291	3,7	7,5	61,1
Минамисома [Minamisoma City]	31	2,8	3,3	26,3
Фукусима [Fukushima City]	22	0,0	0,0	7,3
Остальные [Others]	20	1,4	13,6	64,6

Измерения содержания ^{131}I в щитовидной железе жителей Фукусимы другими приборами и методами

В территориальном округе города Намие, район Цушима (Namie Town, Tsushima District), где, согласно прогнозу SPEEDI, ожидалась доза в ЩЖ детей 1 года от 100 до 500 мЗв (см. рис. 1), 12–16 апреля 2011 г. были измерены 62 человека, из которых 17 человек были местными жителями, а 45 человек – эвакуированными из прибрежных территорий к северу от ФДАЭС [15]. Измерения проведены на сцинтилляционном спектрометре с кристаллом NaI(Tl) $\varnothing 75 \times 75$ мм, с измерениями скорости счёта над ЩЖ и фона в месте измерения человека в каналах пика излучения ^{131}I – 364 кэВ. Калибровочный коэффициент определен экспериментально с использованием фантома шеи и трех фантомов ЩЖ, объемом 4, 12 и 16 мл, которые наполняли раствором ^{131}I . У 46 из 62 измеренных людей были обнаружены детектируемые количества ^{131}I в ЩЖ, с максимумом 1,5 кБк. Эквивалентная доза в ЩЖ по модели однократного ингаляционного поступления и результатам измерений оценена в пределах от 0 до 33 мЗв.

В измеренной группе было всего 5 детей в возрасте до 10 лет. Чтобы оценить максимально возможные дозы в ЩЖ детей, рассчитывали максимальную концентрацию ^{131}I в воздухе по наибольшей измеренной активности в ЩЖ взрослых – 1,5 кБк, предполагая, что радиоактивное облако проходило через населенный пункт в течение 4 ч и человек всё это время находился на улице. Рассчитанная концентрация ^{131}I в воздухе использовалась для расчета ингаляционного поступления детям с учетом возрастных различий объема дыхания, в предположении, что ребёнок находился на улице всё время прохождения облака [15]. Даже при таком консервативном способе оценки уровня облучения ЩЖ максимальные дозы у детей 1 года и 5 лет были оценены в 63 мЗв, то есть существенно меньше прогноза SPEEDI.

В городе Нагасаки, начиная с 16 мая, проводились измерения людей, находившихся в префектуре Фукусима после 11 мая и выехавших не позднее 10.04.2011 г., на стационарном счётчике излучения человека (СИЧ) медицинского факультета университета Нагасаки, размещенном в низкофоновой защищённой камере [16]. Из 173 человек примерно у трети людей были зарегистрированы активности ^{131}I , ^{134}Cs и ^{137}Cs , превышающие минимально детектируемую активность (МДА) – 30 Бк для ^{131}I , 33 Бк для радионуклидов цезия. Измерения сопровождалась регистрацией маршрута и дат передвижения обследуемых по территории Фукусимы. Это позволило выявить, что в группе лиц, находившихся в Фукусиме в течение первой недели после аварии, было наибольшее число измерений выше МДА и наибольшие измеренные активности. Суммарное поступление радионуклидов, оцененное по результатам измерений и по модели однократного ингаляционного поступления, составляло: 1–140 кБк ^{131}I ; для ^{134}Cs и ^{137}Cs 0,16–16 кБк для каждого изотопа. При более позднем нахождении на территории Фукусимы суммарное поступление радионуклидов оценивалось в 15–20 раз ниже. Эквивалентные дозы в ЩЖ оценены ниже 20 мЗв, а эффективные дозы – ниже 1 мЗв у всех измеренных лиц.

В работе [16] также представлен спектр излучения человека, находившегося в 50 км к югу от ФДАЭС до вы-

езда 15 мая и измеренного на СИЧ 16 мая. Спектр демонстрирует пики энергий многих радионуклидов, в том числе ^{132}Te , ^{131}I , ^{132}I , ^{134}Cs и ^{137}Cs . У людей, выехавших из района радиоактивных выпадений раньше 15 мая, короткоживущие радионуклиды ^{132}Te ($T_{1/2}=3,2$ сут) и ^{132}I ($T_{1/2}=2,3$ ч) не обнаружены, а измеренные активности ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs и оценки доз были существенно ниже. Эти измерения подтверждают, что основным источником внутреннего загрязнения жителей были радиоактивные выбросы 15 мая, последовавшие в результате взрыва на втором блоке ФДАЭС.

Все измерения ^{131}I , выполненные в марте – апреле 2011 г., свидетельствуют, что радиационное воздействие на жителей радиоактивно загрязненных территорий было намного меньше, чем предсказывал прогноз SPEEDI. Однако эти прямые измерения не сняли общей тревожности населения по поводу облучения ЩЖ детей. Одним из вопросов беспокойства была оценка вклада короткоживущих изотопов йода в облучение ЩЖ.

Вклад короткоживущих изотопов йода в поглощенную дозу в щитовидной железе жителей Фукусимы

В работах [24, 25] оценивается возможный максимальный вклад короткоживущих изотопов йода в облучение ЩЖ жителей Фукусимы с использованием опыта оценок дозы в ЩЖ у населения, пострадавшего от радиоактивных выбросов Чернобыльской аварии [26, 27].

В работе [26] по результатам прямых спектрометрических измерений ЩЖ 65 жителей города Припять, эвакуированных через 1,5 суток после аварии на ЧАЭС, было показано, что радиологическое значение при ингаляционном поступлении смеси радиоизотопов йода имеют изотопы ^{133}I ($T_{1/2}=20,8$ ч) и ^{132}I ($T_{1/2}=2,3$ ч). Причём ^{132}I вносит свой вклад в облучение ЩЖ как продукт распада ^{132}Te ($T_{1/2}=3,20$ сут), поступившего и отложившегося в органах дыхания, где он распадается до ^{132}I , который через кровоток быстро доходит до ЩЖ, включается в биологические структуры и, распадаясь, облучает ткань ЩЖ. Доза от ^{132}I , который находится в воздухе в равновесии с ^{132}Te , при ингаляционном поступлении в организм человека создает дозу более чем на порядок меньшую, чем от ^{132}Te , отложившегося в легких [29].

Расчет вклада короткоживущих йодов в эквивалентную дозу в ЩЖ основан на двух положениях. Во-первых, отношение $^{133}\text{I}/^{131}\text{I}$ во всех трех реакторах на момент их отключения сразу после цунами (14:46, 11 марта 2011 г.) было 2,1 [24]. Первый выброс радиоактивности произошел 12 мая, однако большая часть выпадений произошла над океаном, лишь немного затронув сушу к северу от ФДАЭС, где жители были уже эвакуированы. Основной выброс произошел от парового взрыва второго блока утром 15.05.2011 г. За время, прошедшее после остановки реакторов, большинство короткоживущих нуклидов в продуктах распада ядерного топлива распались, в том числе количество ^{133}I существенно уменьшилось, отношение $^{133}\text{I}/^{131}\text{I}$ на 15.03.2011 г. оценивалось как 0,12 [25]. Тем не менее, концентрации ^{133}I в воздухе было достаточно, чтобы этот изотоп регистрировался в теле человека, выехавшего из района аварии 15 мая вечером и измеренного на низкофоновом СИЧ 16 мая [16].

Вторым исходным положением для расчета была оценка соотношения ^{132}Te и ^{131}I в воздухе. Оно оценивалось по отношению радионуклидов в пробах почвы и растений, которые регистрировались во время первых радиологических обследований территории 15–19 марта 2011 г. [28]. В докладе НКДАР ООН [3] отношение ^{132}Te к ^{131}I оценено на 15 мая как 0,7 для территорий Фукусимы и соседних префектур, за исключением небольшой прибрежной территории южного следа, где это отношение оценивается как 0,8, такие же соотношения были использованы в работе [29] для расчета дозы в ЩЖ от короткоживущих изотопов йода.

Дозы в железе рассчитывались для трех возрастных групп – 1 год, 10 лет и взрослые. Для основного выброса радиоактивности 15 мая вклад короткоживущих радионуклидов оценивается в пределах 15% от дозы, сформированной ^{131}I . При этом доза от ^{132}I (продукта распада ^{132}Te в теле человека) примерно в 3 раза превосходит дозу от ^{131}I [24, 25]. Если ориентироваться на первый выброс 12 мая, то вклад короткоживущих йодов может достигать 30–40% по сравнению с ^{131}I . В этом случае вклад ^{131}I примерно в два раза выше, чем от ^{132}I – дочернего продукта ^{132}Te в теле человека [24]. Расчетные оценки в предположении начала выбросов 12 мая хорошо согласуются с результатами оценки вкладов короткоживущих изотопов йода в дозу облучения ЩЖ жителей Припяти, эвакуированных через 1,5 суток после аварии на ЧАЭС, для которых вклад ^{131}I составил около 30% дозы от ^{131}I , а ^{132}I от ^{132}Te в лёгких – 13% [26].

Эквивалентные дозы в ЩЖ по данным экологического мониторинга и по измерениям содержания ^{131}I в щитовидной железе жителей Фукусимы

Оценки доз в ЩЖ, выполненные по результатам измерений содержания ^{131}I в ЩЖ жителей, являются наиболее точным методом оценки радиационного воздействия. Они служат набором данных, по которым верифицируют другие методики оценок доз. Сравним оценки эквивалентных доз в ЩЖ, выполненные по результатам измерений с расчетами, выполненными нами в первый год после аварии. В работе [5] 2012 г. сделан вывод: «В префектуре Фукусима в зоне плановой эвакуации среднее значение эквивалентной дозы в щитовидной железе в отдельных муниципальных образованиях и НП (за исключением Намие) изменялось в пределах 20–110 мЗв в зависимости от возраста (нижнее значение соответствует взрослому населению, а верхнее – детям 1 года). В муниципальном образовании Намие диапазон средних доз у указанных возрастных групп населения оценивался как 75–260 мЗв.»

Что касается внутреннего облучения радиоизотопом ^{131}I , то, согласно принятой в 2011 г. модели расчета, основной вклад в дозу ЩЖ получен за счет поступления радионуклидов йода с продуктами питания и водой, в меньшей степени за счет ингаляции, поскольку принималось, что северо-западный след радиоактивного загрязнения был образован в результате влажных выпадений и использовались базы данных радиационного контроля местных продуктов из продуктовой сети Фукусимы. Примененные меры защиты не учитывались в расчетах. В таблице 2 представлены оценки эквивалентных доз внутреннего

облучения ^{131}I для детей 1 года и 10 лет, рассчитанные по экологическим данным, для тех населенных пунктов, в которых были проведены измерения в марте 2011 г. [5].

Таблица 2

Эквивалентные дозы облучения от ^{131}I в ЩЖ детей в некоторых населенных пунктах префектуры Фукусимы, рассчитанные по данным экологического мониторинга, доступным в 2011 г. [5], и по результатам измерений ^{131}I в ЩЖ детей [23], мЗв

[Table 2]

Equivalent doses from ^{131}I in thyroid of children in some localities of Fukushima Prefecture, calculated basing on environmental monitoring data available in 2011 [5] and on the results of ^{131}I measurements in thyroid of children [23], mSv

Населенный пункт [Locality]	Среднее, по экологическим данным [5] [Mean, on environmental monitoring [5]]		Максимальная доза по измерениям [23], [Maximum dose on measurements [23]]
	1 год [1 year]	10 лет [10 years]	0–15 лет [0–15 years]
Кавамата [Kawamata Town]	63	30	31,2
Иваки [Iwaki City]	36	17	47,5
Иитате [Iitate Village]	98	51	61,1
Минамисома [Minamisoma City]	19	10,5	26,3
Фукусима [Fukushima City]	15	8	7,3
Остальные [Others]	17 – 41	9 – 21	64,6

Расчеты 2011 г. давали консервативные оценки возможных средних доз в ЩЖ без учета дат эвакуации и применения других защитных мер, однако они использовали реальные измерения и закономерности изменения активности в воздухе, в продуктах питания, сведения о рационах питания японского населения и другую доступную информацию, что позволило дать правдоподобные оценки доз. Полученные в 2011 г. консервативные оценки доз [5] не входят в противоречие с максимальными значениями довольно ограниченного числа «измеренных» доз, что говорит о правильном подходе к использованию результатов радиоэкологического мониторинга и сведений социального характера для оценки доз внутреннего облучения населения в случае масштабной аварии ядерного реактора с выбросом радиоактивных веществ в атмосферу.

Внутреннее облучение радиоизотопами цезия

Массовые измерения жителей Фукусимы, эвакуированных из 20-километровой зоны и из зоны отсроченной плановой эвакуации (северо-западный радиоактивный след), на содержание радионуклидов цезия (^{134}Cs и ^{137}Cs) во всем теле начались в июле 2011 г. Использовались 4 счетчика измерений человека (СИЧ), при времени измерения 2–3 минуты МДА составила для ^{134}Cs 300–340 Бк, для ^{137}Cs 300–370 Бк [29].

Всего с 11.07.2011 г. по конец января 2012 г. было выполнено 9927 измерений жителей разного возраста старше 4 лет из 11 муниципалитетов Фукусимы. Оказалось, что 80% измерений были ниже МДА [29, 30]. Наибольшие количества ($^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$) составили 14 кБк среди взрослых и 2,7 кБк среди детей младше 8 лет [29, 30].

Ожидаемую эффективную дозу (ОЭД) от внутреннего облучения радиоизотопами цезия оценивали по модели однократного ингаляционного поступления радионуклидов от первого выброса 12 марта. Даже по такой заведомо консервативной модели у 99,8% измеренных жителей ОЭД за первый год после аварии оценена меньше 1 мЗв. Всего у 22 человек оценка дозы превышала 1 мЗв, из них 16 человек – дети меньше 8 лет, 5 – в возрасте 8–12 лет и лишь один взрослый, у которого обнаружена наибольшая ОЭД 3 мЗв. При сравнении высоких измерений у детей с измерениями их родителей выявилось полное отсутствие корреляции: дозы родителей не превышали 0,2 мЗв, а дозы у детей оценены от 0,15 до 1,75 мЗв [29]. Эти результаты говорят о том, что дозы у детей не могут быть объяснены пищевым поступлением радионуклидов при семейном питании. Дополнительные исследования показали, что большая часть высокой счётности СИЧ обусловлена случайным загрязнением внутренней одежды, хотя верхнюю одежду обследуемые снимали перед измерением [29]. Только с января 2012 г. измерения жителей стали проводить в сменной чистой одежде, что гарантировало отсутствие поверхностного загрязнения одежды.

95% перцентиль распределений ОЭД в двух возрастных группах (13–17 лет и взрослые) составил 0,10 мЗв и 0,13, экстраполированные медианы распределений – 0,02 и 0,025 мЗв соответственно. По этим измерениям видно, что внутреннее облучение жителей Фукусимы было весьма небольшим, у абсолютного большинства не превысило за первый год после аварии предела дозы для населения 1 мЗв от поступления в организм радионуклидов йода и цезия.

Во второй год после аварии с 01.04.2012 г. по 31.03.2013 г. проводилось исследование доз внешнего и внутреннего облучения у школьников младшей и средней школы города Минамисома (Minamisoma City), расположенного в 14–38 км к северу от ФДАЭС [31]. Поверхностное загрязнение цезием-137 территории города варьировало от 10 кБк/м² до 3 МБк/м².

Содержание радионуклидов цезия у 987 школьников детей измеряли на стационарных СИЧ, установленных в двух больницах города. МДА для измерения детей составляла 220 Бк для ^{134}Cs и 250 Бк для ^{137}Cs для обоих аппаратов. При оценке дозы предполагалось, что измеренные активности являются равновесными значениями для всего года.

У тех же школьников определяли дозы внешнего облучения, для чего детям выдавали индивидуальные дозиметры-бейджики (Glass Badge: GD-450, Chiyoda Technol Corp.) для ношения в течение 3 месяцев трижды за год скрининговой программы в периоды: 01.06–31.08.2012; 01.09–30.11.2012; 01.12.2012–28.02.2013. Для определения техногенной эффективной дозы внешнего облучения из результатов считывания дозиметров вычиталась величина естественного фона 0,54 мЗв/год, которая была определена до аварии с такими же дозиметрами в соседней префектуре Ибараки. Эффективные дозы за три пе-

риода ношения складывались, и рассчитывалась средняя доза за день, годовая доза вычислялась умножением на 365.

Из 987 участников были исключены те лица, которые проживали за пределами Минамисомы, анализировались результаты 881 детей от 6 до 15 лет, у которых были проведены измерения внешнего облучения и внутреннего содержания ($^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$) в течение второго года после аварии на ФДАЭС. Из всех участников только у 3 человек зарегистрировано превышение МДА для ^{134}Cs и ^{137}Cs : (245 и 566), (364 и 452), (401 и 615) Бк в теле, что соответствовало дозам: 0,040, 0,069 и 0,085 мЗв/год. Для всех остальных участников проекта с активностью в теле меньше МДА максимально возможную дозу оценили из предположения постоянного ежедневного поступления радионуклидов и для содержания в теле на уровне МДА двух изотопов цезия. Дозы внутреннего облучения за второй год после аварии не превышают 0,066, 0,04 и 0,025 мЗв соответственно для детей 6–7, 8–12 и 13–15 лет. Для тех же детей доза внешнего облучения, согласно проведенным измерениям, варьировала от 0 до 3,45 мЗв/год со значением медианы 0,66 мЗв/год. Дополнительная эффективная доза за второй год после аварии на АЭС у 78% школьников была ниже 1 мЗв, что говорит о минимальном риске радиационно обусловленных эффектов для здоровья детей [31].

Медиана суммарной эффективной дозы составила 0,70 мЗв с разбросом индивидуальных значений от 0,025 до 3,49 мЗв/год. Среднее соотношение внешней и внутренней дозы у детей оценивается как 0,66 : 0,04, дозы внешнего облучения вносили более 90% в суммарную дозу [31]. Эти измерения показывают, что хроническое облучение жителей, проживающих после аварии на ФДАЭС на загрязненной территории, формируется в основном за счет внешнего излучения. В мае – июне 2013 г. в Минимасома были измерены на СИЧ 3255 школьников младшей и средней школы, это 98% от всех школьников данной возрастной группы в городе. Не было выявлено ни одного человека с измеримым содержанием ($^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$) в организме [32], что наглядно демонстрирует отсутствие риска внутреннего облучения для жителей Фукусимы. Принятые меры жёсткого контроля и отбраковки местных продуктов с концентрацией ^{137}Cs выше 100 Бк/кг привели к практически полному исключению загрязненных продуктов из рациона питания жителей Фукусимы.

Обсуждение

Проведенный анализ работ по оценке доз внутреннего облучения жителей префектуры Фукусима вследствие аварии на АЭС Фукусима Дайичи, вызванной разрушительным землетрясением и цунами 11 марта 2011 г., показал, что поступление радионуклидов в организм жителей было минимальным. Результаты прямых измерений ^{131}I в ЩЖ и радионуклидов цезия в организме жителей префектуры Фукусима демонстрируют, что поступление радионуклидов в организм и внутреннее облучение после аварии на ФДАЭС было значительно меньше, чем в Чернобыле. Принятые вовремя правительственные решения о мерах защиты населения – экстренная эвакуация населения из 10-, затем 20-километровой зоны до основных выбросов радиоактивности в атмосферу, установление зоны готовности к эвакуации и объявление режима

укрытия в жилищах в 20–30-километровой зоне, а также строгое выполнение мер защиты населения привели к тому, что ингаляционное поступление радионуклидов во время прохождения радиоактивного облака от основного выброса 15 мая для большинства жителей было снижено или предотвращено полностью. Нахождение в закрытом помещении особенно помогло снизить ингаляционную дозу у детей, поэтому вполне ожидаемо, что абсолютное большинство детей не имели измеримого накопления радиоизотопов йода в ЩЖ и радионуклидов цезия в организме. Значения медианы распределений индивидуальных оценок доз в ЩЖ в отдельных населенных пунктах не удалось достоверно оценить, т.к. они попадали в область измерений «ниже фона», а значения верхнего квартиля оценок доз в ЩЖ для отдельных муниципалитетов определены в пределах 3–9 мЗв; максимально возможные индивидуальные оценки доз, выполненные по консервативному сценарию однократного ингаляционного поступления, оценены в пределах 50–65 мЗв. Такие оценки поглощенных доз в ЩЖ не дают оснований ожидать в будущем повышения заболеваемости раком ЩЖ среди жителей, переживших аварию на ФДАЭС в детском и подростковом возрасте.

Относительно пищевого поступления радионуклидов следует сделать несколько замечаний. Некоторые продукты местного производства, а также вода в некоторых муниципалитетах были загрязнены радионуклидами, что было зарегистрировано радиационным контролем. Критерии отбраковки загрязненных продуктов и воды при уровне выше 100 Бк/кг были введены 21.05.2011 г., после чего их поступление в торговую сеть было жестко пресечено. Есть некоторая вероятность, что в течение недели после основного выброса радионуклидов малая часть жителей могла использовать в пищу загрязненные продукты. Местные органы власти и комиссия Национального института ядерных исследований (NIRS) по ядерному реагированию на чрезвычайные ситуации ставят задачу провести опрос всех эвакуированных и оставшихся жить на загрязненной территории жителей и оценить индивидуализированные дозы внешнего и внутреннего облучения в соответствии с их поведением во время аварии, так как малое число прямых измерений ^{131}I в ЩЖ не гарантирует отсутствия более высоких доз в ЩЖ у некоторых жителей.

Опасность внутреннего облучения оценивалась по многочисленным измерениям содержания ($^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$) в организме жителей загрязненных территорий префектуры Фукусима, которые показали, что эффективная доза внутреннего облучения жителей за первый год после аварии оценивается в сотые доли мЗв. В последующие годы содержание радионуклидов цезия в теле жителей оказалось практически не измеримым на СИЧ (меньше МДА).

Несмотря на такие успокоительные результаты скрининга внутреннего облучения, беспокойство населения относительно последствий облучения детей не уменьшилось. Причиной этому являются, с одной стороны, перенесенные на ситуацию Фукусимы ожидания таких же последствий воздействия радиоизотопов йода на детей, как после аварии на Чернобыльской АЭС. С другой стороны, 23 марта 2011 г. Комиссия по ядерной безопасности Японии (Nuclear Safety Commission of Japan) опубликовала предварительный прогноз радиологических послед-

ствий аварии SPEEDI [12], согласно которому эффективные дозы среди населения загрязненных территорий Фукусимы прогнозировались на уровне 20 мЗв за первый год и выше, а эквивалентные дозы в ЩЖ детей в возрасте 1 года – в пределах от 100 до 1000 мЗв в зоне эвакуации и за её пределами [14, 16, 34, 36]. Прогноз вызвал панику среди населения, которую трудно удаётся нивелировать разумными доводами и результатами скрининга до настоящего времени.

Относительно внутреннего облучения в прогноз SPEEDI была заложена абсолютно не реализуемая модель поступления радионуклидов в организм жителей: ингаляционное равномерное поступление, начиная с первого небольшого выброса 12 марта до 25 марта, при нахождении человека всё время на открытом воздухе. Это привело к переоценке прогнозных оценок более чем на порядок по внешнему излучению, и ещё большей переоценке по дозам внутреннего облучения, что продемонстрировали скрининговые измерения содержания ^{131}I в ЩЖ и радионуклидов цезия в теле жителей Фукусимы.

Из Фукусимской ситуации послеаварийных оценок доз можно сделать следующие выводы относительно прогнозирования радиологических последствий:

- разработанные модели оценок доз у населения на случай ядерной аварии с выбросом в атмосферу радиоактивных веществ нельзя механически переносить с одной территории на другую, необходимо учитывать особенности быта, питания, поведения местного населения;
- при использовании модели в конкретной ситуации для прогноза доз населения необходимо учитывать реально выполненные меры защиты, рассматривать факторы, влияющие на уровень облучения, такие как место жительства (городской или сельский), род деятельности, тип жилища, наличие семейного подсобного хозяйства и иные местные особенности;
- доводить до сведения общественности от имени ответственного научного или правительственного органа можно только тщательно проверенные данные и прогнозы в таком виде, который понятен непрофессионалам; если в СМИ попала ошибочная информация, то следует в том же источнике добиваться размещения правильной информации и разъяснения ошибочности предыдущих сведений.

Следует отметить, что авария на ФДАЭС принципиально отличается от аварии на Чернобыльской АЭС тем, что из-за выполнения своевременных и эффективных мер радиационной защиты населения закономерности формирования доз облучения населения после Чернобыля не могут напрямую быть перенесены на ситуацию после аварии в Фукусиме, так как соотношения доз внешнего и внутреннего облучения, ингаляционного и пищевого поступления в Фукусиме изначально оказались иными по сравнению с Чернобылем.

Следует также учитывать, что размеры следа загрязнения в Фукусиме было весьма ограниченным (примерно 50–60 на 20 км) по сравнению с огромными территориями загрязнения в Белоруссии, России и Украине; экономическая ситуация и мобильность населения в Японии значительно отличались от ситуации в СССР в 1980-е гг. В Японии население могло быстро покинуть зону загрязнения, оно практически не зависело от продуктов местного производства, так как сеть супермаркетов обеспе-

чивала всем необходимым, а радиационный контроль продуктов практически свёл к нулю пищевое поступление активности.

Заключение

После аварии на ФДАЭС в марте 2011 г. были проведены скрининговые измерения содержания ^{131}I в ЩЖ 1080 детей от 0 до 15 лет из наиболее загрязнённых муниципалитетов префектуры Фукусима. 55% измерений ЩЖ показали полное отсутствие ^{131}I в железе. Эквивалентные дозы в ЩЖ, оцененные по измерениям, превышающим МДА, оказались в пределах 50 мЗв у абсолютного большинства детей. Несмотря на малое число прямых измерений, их распределение не даёт оснований прогнозировать повышение радиогенной заболеваемости раком ЩЖ среди детского населения префектуры Фукусима, так как фактор радиационного воздействия у большинства детей отсутствовал.

Оценки эффективной дозы внутреннего облучения радиоизотопами цезия, выполненные по результатам СИЧ измерений, показали, что за первый год после аварии эффективные дозы внутреннего облучения жителей Фукусимы были ниже 0,1 мЗв, то есть в 10–50 раз ниже допустимого предела дозы техногенного облучения для населения. Во второй и третий год после аварии у более 99% жителей не было измеримых содержаний радионуклидов в организме.

Проведенный анализ доступной информации по внутреннему облучению жителей Фукусимы вследствие аварии на ФДАЭС даёт основание считать, что среди детского и взрослого населения нет оснований ожидать дополнительных онкологических заболеваний, в том числе и раком ЩЖ, вызванных аварийным облучением в 2011 году, и заметных на фоне спонтанной онкологической заболеваемости.

Литература

1. WHO. Preliminary dose estimation from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami. World Health Organization. Geneva, 2012.
2. WHO. Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami based on a preliminary dose assessment. Draft report of the World Health Organisation. Geneva, February 2013. World Health Organisation. Geneva, 2013.
3. United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation (UNSCEAR). Levels of effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 Great East-Japan Earthquake and Tsunami, 2014. UNSCEAR 2013 Report Volume 1. Scientific Annex A: http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2013_1.html (дата обращения: 21.06.2020)
4. Fukushima, one year later. Initial analyses of the accident and its consequences. Report IRSN/DG/2012-003 of March 12. Paris, 2012.
5. Голиков В.Ю., Звонова И.А. Оценка доз облучения жителей Японии. В монографии «Авария на АЭС «Фукусима-1». Под ред. акад. РАМН Г.Г. Онищенко. СПб.: НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева, 2012. 336 с.
6. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2008 report Vol. II. Effects of ionizing radiation. Annex D: Health effects due to radiation from the Chernobyl accident. United Nations. New York, 2011.
7. Cardis E., Kesminiene A., Ivanov V., et al. Risk of thyroid cancer after exposure to ^{131}I in childhood // *Journal of the National Cancer Institute*. 2005. Vol. 97, No 10. P. 724-732.
8. Cardis E., Howe G., Ron E., et al. Cancer consequences of the Chernobyl accident: 20 years after // *Journal of Radiological Protection*. 2006. Vol. 26. P. 127-140
9. Likhtarev I., Kovgan L., Vavilov S., et al. Chepurny M., Ron E., Lubin J. Post-Chernobyl thyroid cancers in Ukraine, Report 2: Risk analysis // *Radiation Research*. 2006. Vol. 166, No 2. P. 375-386.
10. Preston D.L., Ron E., Tokuoka S., et al. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958-1998 // *Journal of Radiation Research*. 2007. Vol. 168, No 1. P. 1-64.
11. Furukawa K., Preston D., Funamoto S., et al. Long-term trend of thyroid cancer risk among Japanese atomic-bomb survivors: 60 years after exposure // *International Journal of Cancer*. 2013. Vol. 132, No 5. P. 1222-1226.
12. Nuclear Regulation Authority of Japan: http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/mext_speedi/0312-0324_in.pdf (дата обращения: 21.06.2020)
13. Kim E., Kurihara O., Suzuki T., et al. Screening survey on thyroid exposure for children after the Fukushima Daiichi nuclear power station accident (NIRS-M-252). In: *Proceedings of the 1st NIRS Symposium on Reconstruction of Early Internal Dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident*. Chiba, Japan; National Institute of Radiological Sciences; 2012. P. 59-66: http://www.nirs.go.jp/publication/irregular/pdf/nirs_m_252.pdf (дата обращения: 21.06.2020)
14. Hosokawa Y., Hosoda M., Nakata A., Kon M. Thyroid Screening Survey on Children after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident // *Radiation Emergency Medicine*. 2013. Vol. 2, No 1. P. 82-86.
15. Tokonami S., Hosoda M., Akiba S., et al. Thyroid doses for evacuees from the Fukushima nuclear accident // *Scientific Reports*. 2012. No 2. P. 507.
16. Matsuda N., Kumagai A., Ohtsuru A., et al. Assessment of Internal Exposure Doses in Fukushima by a Whole Body Counter Within One Month after the Nuclear Power Plant Accident // *Journal of Radiation Research*. 2013. No 179. P. 663-668.
17. Ohtsuru A., Midorikawa S., Ohira T., et al. Incidence of Thyroid Cancer Among Children and Young Adults in Fukushima, Japan, Screened With 2 Rounds of Ultrasonography Within 5 Years of the 2011 Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident // *Journal of Otolaryngology – Head & Neck Surgery*. 2019. Vol. 145, No 1. P. 4-11.
18. Balonov M.I., Anspaugh L.R., Bouville A., Likhtarev I.A. Contribution of internal exposures to the radiological consequences of the Chernobyl accident // *Radiation Protection Dosimetry*. 2007. Vol. 127, No 1-4. P. 491-6. Epub 2007/11/06. doi: 10.1093/rpd/ncm301 PMID: 17977893.
19. Nagataki S., Shisume K., Nakao R. Thyroid Function in Chronic Excess Iodine Ingestion: Comparison of Thyroidal Absolute Iodine Uptake and Degradation of Thyroxine in Euthyroid Japanese Subjects // *Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*. 1967. Vol. 27, No 5. P. 638-647.
20. Zvonova I.A. Dietary intake of stable iodine and some aspects of radioiodine dosimetry // *Health Physics*. 1989. Vol. 57, No 3. P. 471-475.
21. ICRP, 1989. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 1. ICRP Publication 56. Ann. ICRP 20(2).
22. Kim E., Kurihara O., Kunishima N., et al. Internal thyroid doses to Fukushima residents—estimation and issues remaining // *Journal of Radiation Research*. 2016. No 57. P. i118-i126.
23. Kim E., Yajima K., Hashimoto S., et al. Reassessment of Internal Thyroid Doses to 1,080 Children Examined in a Screening Survey after the 2011 Fukushima Nuclear Disaster // *Health Physics*. 2019. Vol. 118, No 1. P. 1. DOI: 10.1097/HP.0000000000001125
24. Shinkarev S.M., Kotenko K.V., Granovskaya E.O., et al. Estimation of the contribution of short-lived radioiodines to the thyroid dose for the public in case of inhalation intake

- following the Fukushima accident // Radiation Protection Dosimetry. 2015. Vol. 164, No 1-2. P. 51–56. Doi:10.1093/rpd/ncu335.
25. Шинкарев С.М., Самойлов А.С., Грановская Е.О., и др. Сравнительный анализ вклада короткоживущих изотопов йода в дозу облучения щитовидной железы у населения после Чернобыльской и Фукусимской аварий // Гигиена и санитария. 2017. Т. 96, № 9. С. 827–832.
 26. Balonov M., Kaidanovsky G., Zvonova I., et al. Contributions of short-lived radioiodines to thyroid doses received by evacuees from the Chernobyl area estimated using early in vivo activity measurements // Radiation Protection Dosimetry. 2003. Vol. 105, No 1–4. P. 593–599.
 27. Gavrilin Yu., Khrouch V., Shinkarev S., et al. Individual thyroid dose estimation for a case-control study of Chernobyl-related thyroid cancer among children of Belarus—Part I: ^{131}I , short-lived radioiodines (^{132}I , ^{133}I , ^{135}I), and short-lived radiotelluriums ($^{131\text{m}}\text{Te}$ and ^{132}Te) // Health Physics. 2004. No 86. P. 565–585.
 28. Hosoda M., Tokonami Sh., Tazoe H., et al. Activity concentrations of environmental samples collected in Fukushima Prefecture immediately after the Fukushima // Scientific Reports. 2013. No 3. P. 2283. DOI: 10.1038/srep02283.
 29. Momose T., Takada Ch., Nakagawa T., et al. Whole-body Counting of Fukushima Residents after the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident. (NIRS-M-252). In: Proceedings of the 1st NIRS Symposium on Reconstruction of Early Internal Dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident. Chiba, Japan. National Institute of Radiological Sciences; 2012. P. 67–82.
 30. Takada C., Kurihara O., Tsujimura N., et al. Evaluation of Internal Exposure of the Workers and the Residents Caused by the Fukushima Nuclear Accident. 13th International Congress of International Radiation Protection Association (IRPA13) At: Glasgow, Scotland: <http://www.irpa13glasgow.com/information/downloads/>, File P12.22.doc. (дата обращения: 21.06.2020).
 31. Tsubokura M., Kato S., Morita T., et al. Assessment of the Annual Additional Effective Doses amongst Minamisoma Children during the Second Year after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Disaster // PLoS ONE. 2015. Vol. 10, No 6. P. e0129114. doi:10.1371/journal.pone.0129114.
 32. Tsubokura M., Kato S., Nomura S., et al. Absence of internal radiation contamination by radioactive cesium among children affected by the Fukushima Daiichi nuclear power plant disaster // Health Phys. 2015. Vol. 108. P. 39–43.

Поступила: 21.06.2020 г.

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

Для цитирования: Звонова И.А. Дозы внутреннего облучения у населения префектуры Фукусима вследствие аварии на АЭС Фукусима-Дайичи // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 98–109. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-98-109

Internal doses to the public in the Fukushima prefecture from the Fukushima Daiichi NPP accident

Irina A. Zvonova

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 article is devoted to the analysis of internal dosimetry in residents of Fukushima Prefecture due to the accident at the Fukushima-Daiichi NPP. On March 24–30, 2011, screening studies were conducted on measurements of ^{131}I content in thyroid gland of children in those municipalities where the Japanese program for assessing the radiological consequences of the radiation accident “SPEEDI” predicted doses in the thyroid of one-year children from 100 to 500 mSv. Among 1080 children measured, 55% had results below the background, and the maximum estimate of the equivalent dose in the thyroid was 43 mSv. Measurements of several dozen inhabitants with other instruments and methods confirmed low levels of ^{131}I in the thyroid. In total, the ^{131}I thyroid direct measurement database of Fukushima residents contains approximately 1300 individuals. 75% quartile of individual thyroid dose distributions was below 10 mSv, the median was from 0 to 3.7 mSv

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: ir_zv@bk.ru

among children aged from 0 to 15 years in the five examined municipalities. The contribution of short-lived iodine radionuclides was estimated as 15% of the dose from ^{131}I for the main radioactive release on March 15. The effective dose of internal exposure to cesium radionuclides ($^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$), estimated from 10 thousand whole body measurements for the first year after the accident, was below 0.1 mSv in 90% of the examined people. Whole body measurements of children 6–15 years old in the second year after the accident confirmed the values of the effective dose of internal exposure less than 0.1 mSv, while the estimates of the effective dose of external exposure in the same children with using individual dosimeters determined the median distribution as 0.66 mSv with a maximum value of 3.45 mSv. The measurement results do not provide any basis to expect a future increase in the incidence of thyroid cancer and other radiogenic diseases among the Fukushima residents. Preventive evacuation of the population before the radioactive release, stay in enclosed dwellings, strict radiation control of food products have effectively reduced the expected doses of internal exposure to residents. In the predictions of the radiological consequences of the accident, it is necessary to take into account the actually implemented measures to protect the population, and local characteristics of the style of life and living.

Key words: accident at the Fukushima Daiichi NPP, radiological consequences, population, internal radiation doses, thyroid gland, radionuclides of iodine and cesium.

References

1. WHO. Preliminary dose estimation from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami. World Health Organization. Geneva, 2012.
2. WHO. Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami based on a preliminary dose assessment. Draft report of the World Health Organisation. Geneva, February 2013. World Health Organisation. Geneva, 2013.
3. United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation (UNSCEAR). Levels of effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 Great East-Japan Earthquake and Tsunami, 2014. UNSCEAR 2013 Report Volume 1. Scientific Annex A: http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2013_1.html (дата обращения: 21.06.2020)
4. Fukushima, one year later. Initial analyses of the accident and its consequences. Report IRSN/DG/2012-003 of March 12. Paris, 2012.
5. Golikov VYu, Zvonova IA. Dose assessments to residents of Japan. In the monograph: "Accident at the Fukushima-1 NPP", Ed. Acad. RAMS G.G. Onischenko. Saint-Petersburg: NIIRG named after Prof. P.V. Ramzaev; 2012: 336. (In Russian).
6. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2008 report Vol. II. Effects of ionizing radiation. Annex D: Health effects due to radiation from the Chernobyl accident. United Nations. New York, 2011.
7. Cardis E, Kesminiene A, Ivanov V, Malakhova IV, Shibata Y, Khrouch V, et al. Risk of thyroid cancer after exposure to ^{131}I in childhood. *Journal of the National Cancer Institute*. 2005;97(10): 724–732.
8. Cardis E, Howe G, Ron E, Bebesko V, Bogdanova T, Bouville A, et al. Cancer consequences of the Chernobyl accident: 20 years after. *Journal of Radiological Protection*. 2006;26: 127–140.
9. Likhtarev I, Kovgan L, Vavilov S, Chepurny M, Ron E, Lubin J, et al. Post-Chernobyl thyroid cancers in Ukraine, Report 2: Risk analysis. *Radiation Research*. 2006;166(2): 375–386.
10. Preston DL, Ron E, Tokuoka S, Funamoto S, Nishi N, Soda M, et al. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958–1998. *Journal of Radiation Research*. 2007;168(1): 1–64.
11. Furukawa K, Preston D, Funamoto S, Yonehara S, Ito M, Tokuoka S, et al. Long-term trend of thyroid cancer risk among Japanese atomic-bomb survivors: 60 years after exposure. *International Journal of Cancer*. 2013;132(5): 1222–1226.
12. Nuclear Regulation Authority of Japan. Available from: http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/mext_speedi/0312-0324_in.pdf [Accessed 21 June 2020].
13. Kim E, Kurihara O, Suzuki T, Matsumoto M, Fukutsu K, Fukutsu Yu, et al. Screening survey on thyroid exposure for children after the Fukushima Daiichi nuclear power station accident (NIRS-M-252). In: Proceedings of the 1st NIRS Symposium on Reconstruction of Early Internal Dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident. Chiba, Japan; National Institute of Radiological Sciences; 2012: 59–66: http://www.nirs.go.jp/publication/irregular/pdf/nirs_m_252.pdf [Accessed 21 June 2020].
14. Hosokawa Y, Hosoda M, Nakata A, Kon M. Thyroid Screening Survey on Children after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident. *Radiation Emergency Medicine*. 2013;2(1): 82–86.
15. Tokonami S, Hosoda M, Akiba S, Sorimachi A, Kashiwakura I, Balonov M. Thyroid doses for evacuees from the Fukushima nuclear accident. *Scientific Reports*. 2012; 2: 507.
16. Matsuda N, Kumagai A, Ohtsuru A, Morita N, Miura M, Yoshida M, et al. Assessment of Internal Exposure Doses in Fukushima by a Whole Body Counter Within One Month after the Nuclear Power Plant Accident. *Journal of Radiation Research*. 2013;179: 663–668.
17. Ohtsuru A, Midorikawa S, Ohira T, Suzuki S, Takahashi H, Murakami M, et al. Incidence of Thyroid Cancer Among Children and Young Adults in Fukushima, Japan, Screened With 2 Rounds of Ultrasonography Within 5 Years of the 2011 Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident. *Journal of Otolaryngology – Head & Neck Surgery*. 2019;145(1): 4–11.
18. Balonov MI, Anspaugh LR, Bouville A, Likhtarev IA. Contribution of internal exposures to the radiological consequences of the Chernobyl accident. *Radiation Protection Dosimetry*. 2007;127(1–4): 491–6. Epub 2007/11/06. doi: 10.1093/rpd/ncm301 PMID: 17977893.
19. Nagataki S, Shisume K, Nakao R. Thyroid Function in Chronic Excess Iodide Ingestion: Comparison of Thyroidal Absolute Iodine Uptake and Degradation of Thyroxine in Euthyroid Japanese Subjects. *Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*. 1967;27(5): 638–647.
20. Zvonova IA. Dietary intake of stable iodine and some aspects of radiiodine dosimetry. *Health Physics*. 1989;57(3): 471–475.
21. ICRP, 1989. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 1. ICRP Publication 56. Ann. ICRP 20(2).
22. Kim E, Kurihara O, Kunishima N, Momose T, Ishikawa T, Akashi M. Internal thyroid doses to Fukushima residents—estimation and issues remaining. *Journal of Radiation Research*. 2016; 57: i118–i126.
23. Kim E, Yajima K, Hashimoto S, et al. Reassessment of Internal Thyroid Doses to 1,080 Children Examined in a Screening Survey after the 2011 Fukushima Nuclear Disaster. *Health Physics*. 2019;118(1): 1. DOI: 10.1097/HP.0000000000001125

24. Shinkarev SM, Kotenko KV, Granovskaya EO, Yatsenko VN, Imanaka T, Hoshi M. Estimation of the contribution of short-lived radioiodines to the thyroid dose for the public in case of inhalation intake following the Fukushima accident. *Radiat. Prot. Dosimetry*. 2015;164(1-2): 51–56. Doi:10.1093/rpd/ncu335.
25. Shinkarev SM, Samoilov AS, Granovskaya EO, Korneva EA, Kukhta BA, Androsova AA, et al. Comparative analysis of the contribution of short-lived iodine isotopes to the thyroid dose in the population after the Chernobyl and Fukushima accidents. *Gigiena i sanitariya = Hygiene and sanitation*. 2017; 96 (9): 827-832. (In Russian).
26. Balonov M, Kaidanovsky G, Zvonova I, Kovtun A, Bouville A, Luckyanov N, et al. Contributions of short-lived radioiodines to thyroid doses received by evacuees from the Chernobyl area estimated using early in vivo activity measurements. *Radiation Protection Dosimetry*. 2003;105(1–4): 593–599.
27. Gavrilin Yu, Khrouch V, Shinkarev S, Drozdovitch V, Minenko V, Shemiakina E, et al. Individual thyroid dose estimation for a case-control study of Chernobyl-related thyroid cancer among children of Belarus—Part I: ^{131}I , short-lived radioiodines (^{132}I , ^{133}I , ^{135}I), and short-lived radiotelluriums ($^{131\text{m}}\text{Te}$ and ^{132}Te). *Health Physics*. 2004;86: 565–585 .
28. Hosoda M., Tokonami Sh, Tazoe H, Sorimachi A, Monzen S, Osanai M, et al. Activity concentrations of environmental samples collected in Fukushima Prefecture immediately after the Fukushima. *Scientific reports*. 2013;3: 2283. DOI: 10.1038/srep02283.
29. Momose T, Takada Ch, Nakagawa T, Kanai K, Kurihara O. Whole-body Counting of Fukushima Residents after the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident. (NIRS-M-252). In: Proceedings of the 1st NIRS Symposium on Reconstruction of Early Internal Dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident. Chiba, Japan. National Institute of Radiological Sciences; 2012: 67–82.
30. Takada C, Kurihara O, Tsujimura N, Kanai K, Nakagawa T, Miyauchi H, et al. Evaluation of Internal Exposure of the Workers and the Residents Caused by the Fukushima Nuclear Accident. 13th International Congress of International Radiation Protection Association (IRPA13) At: Glasgow, Scotland. – Available from: <http://www.irpa13glasgow.com/information/downloads/>, File P12.22.doc. [Accessed 21 June 2020].
31. Tsubokura M, Kato S, Morita T, Nomura S, Kami M, Sakaiharu K, et al. Assessment of the Annual Additional Effective Doses amongst Minamisoma Children during the Second Year after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Disaster. *PLoS ONE*. 2015;10(6): e0129114. doi:10.1371/journal.pone.0129114.
32. Tsubokura M, Kato S, Nomura S, et al. Absence of internal radiation contamination by radioactive cesium among children affected by the Fukushima Daiichi nuclear power plant disaster. *Health Phys*. 2015;108: 39–43.

Received: June 21, 2020

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

For citation: Zvonova I.A. Internal doses to the public in the Fukushima prefecture from the Fukushima Daiichi NPP accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No 3. P. 98-109. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-98-109

Риск, уровни облучения и меры радиационной защиты молочной железы у женщин при проведении рентгенографических процедур

С.А. Кальницкий, Е.Р. Ладанова

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

Цель работы — рассмотреть вопросы радиационной защиты молочной железы у женщин при проведении рентгенологических исследований в свете современных научных представлений. Данный интерес объясняется отношением молочной железы Международной комиссией по радиационной защите (Публикация № 103) к наиболее радиочувствительным органам при использовании источников ионизирующего излучения. Материалы и методы — исследованы (проанализированы): риски ионизирующего излучения, заболеваемость раком молочной железы, объем и динамика рентгенологических исследований, органные и эффективные дозы облучения женщин. Результаты — показано, что при переходе на взвешивающие тканевые коэффициенты из Публикации № 103 Международной комиссии по радиационной защите эффективная доза облучения молочной железы при проведении маммографии увеличивается в 2,4 раза. Показано, что среди различных онкологических заболеваний рак молочной железы у женщин занимает первое место (составляя 85 на 100 тыс. чел.) и постоянно увеличивается (за 25 лет в 2 раза), намного опережая другие локализации. Внедрение скрининга рака молочной железы за это время способствовало значительному (в десятки раз) увеличению маммографий, что позволило повысить выявляемость заболевания, но при этом существенно возросла коллективная доза: в 2 раза за последние 7 лет. Определено, что облучение молочной железы у женщин при проведении маммографии составляет лишь часть ее суммарного облучения от всех рентгенологических исследований. Средняя органная доза молочной железы от всех рентгенографических процедур составляет: в прямой проекции 1,57 мГр (в диапазоне от 0,20 мГр до 3,31 мГр для разных локализаций исследований) и в боковой 2,91 мГр (в диапазоне от 0,51 мГр до 9,29 мГр). Значительное облучение молочной железы обуславливают исследования костей скелета и, в частности, позвоночника, в том числе грудного (2,98 мГр) и поясничного отделов (4,57 мГр). Заключение — предлагается разработать меры радиационной защиты молочной железы у женщин при проведении рентгенологических исследований, отсутствующие в настоящее время, в том числе с помощью оптимизации дозы облучения и контроля качества. Следует, по возможности, закрывать молочные железы во время проведения рентгенологических исследований рентгенозащитным фартуком, особенно в боковой проекции, не мешая процессу обследования пациентки.

Ключевые слова: рентгенологическое исследование, медицинское облучение, женщины, молочная железа, заболеваемость, рак молочной железы, маммография, органная доза, риск, эффективная доза, радиационная защита, оптимизация, контроль качества.

Введение

Согласно Публикации Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) № 103 «Рекомендации 2007 г. Международной комиссии по радиационной защите», молочная железа (МЖ) впервые отнесена к наиболее радиочувствительным органам [1]. Это означает, что при медицинских диагностических рентгенологических исследованиях (РЛИ) она подвергается повышенному риску облучения. Как следствие, облучение МЖ приводит к увеличению эффективной дозы (ЭД) у женщин в лучевой диагностике, а потому она в первую очередь

нуждается в радиационной защите. В отечественном регулировании медицинского облучения данный аспект пока не нашел практического применения.

Параллельно с вышесказанным в российской популяции растет онкологическая заболеваемость, в том числе у женщин, включая рак МЖ. Данный процесс обуславливает необходимость увеличения числа диагностических и особенно профилактических (скрининговых) исследований (маммография, томосинтез) МЖ, направленных на раннее выявление рака МЖ у женщин, что, в свою очередь, сопровождается дополнительным облучением

Кальницкий Сергей Анатольевич

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: s.kalnitsky@niirg.ru

женщин [2]. Помимо маммографии, облучение МЖ происходит также при других РЛИ, включая рентгенографию (рентгеновские снимки), число которых постоянно растет.

Следует отметить, что существующая в РФ система сбора данных по уровням облучения пациентов не позволяет (и не предусматривает) оценки органных (поглощенных) доз, включая МЖ, при проведении рентгенорадиологических исследований.

Цель исследования – оценка уровней облучения МЖ при проведении различных, в первую очередь рентгенографических, РЛИ в лучевой диагностике и разработка рекомендаций по дальнейшей стратегии и тактики радиационной защиты пациенток.

Задачи исследования

1. Анализ современного риска ионизирующего излучения.
2. Изучение заболеваемости женщин раком МЖ.
3. Исследование использования методов РЛИ в лучевой диагностике, включая рентгенографию (и маммографию).
4. Определение доз облучения МЖ пациенток при проведении маммографии и других РЛИ.
5. Разработка рекомендаций по защите МЖ у женщин при проведении РЛИ.

Материалы и методы

В настоящей работе изучены: радиационные риски ионизирующего излучения, заболеваемость населения, включая онкологическую, в том числе МЖ у женщин, объем РЛИ, в том числе рентгенологические процедуры (РЛП), а также дозы облучения пациентов.

Риски ионизирующего излучения рассмотрены на основе данных публикаций МКРЗ № 26 [3], № 60 [4] и № 103 [1]. Сведения по заболеваемости МЖ взяты из сборников «Здравоохранение в России» за последние годы [5]. Данные по количеству РЛИ получены на основе анализа форм статистического наблюдения №3-ДОЗ «Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских диагностических рентгенорадиологических исследований» в РФ [2].

Собственные экспериментальные дозиметрические исследования проводились в 17 медицинских организациях Санкт-Петербурга. В работе исследовано 10 маммографов типа Alpha III ST (Финляндия), GIOTTO (Италия), Mammomat (Германия) и др. и 10 стационарных рентгенодиагностических аппаратов различных типов, включая OPERA, Сирескоп (Германия), РИМ (Италия) и др. На каждом аппарате проводился контроль эксплуатационных параметров, в ходе которого определялись режимы исследования, в том числе напряжение на рентгеновской трубке (кВ), экспозиция (мАс), размер поля облучения (см²), расстояние «источник – приемник излучения (см)», а на маммографах – компрессия МЖ.

Измерялся также радиационный выход рентгеновских аппаратов (мГр·м²)/(мА·с), на основании которого рассчитывались как органные (поглощенные) дозы МЖ, так и ЭД облучения пациенток по методике, приведенной в методических указаниях [6], а также по компьютерной программе РСХМС 2.0 [7].

Результаты и обсуждение

1. Анализ риска ионизирующего излучения

В 2007 г. МКРЗ пересмотрела связанный с облучением риск, как для раковых заболеваний (1), так для

Изменения рисков облучения человека ионизирующим излучением по данным МКРЗ

Таблица 1

[Table 1]

Changes in the ICRP risks of human ionizing exposure]

Орган (ткань) [Organ (tissue)]	Рак [Cancer]	Риск облучения, Зв ⁻¹ [risk irradiation, Sv ⁻¹]		
		МКРЗ № 26 1977 г. [3] [ICRP № 26]	МКРЗ № 60 1990 г. [4] [ICRP № 60]	МКРЗ № 103 2007 г. [1] [ICRP № 103]
Гонады [Gonads]	Смерт.+несм. [lethal. + nonlethal]	1,0·10 ⁻²	1,50·10 ⁻²	0,09·10 ⁻²
ККМ* [red bone marrow]	Смерт.+несм. [lethal. + nonlethal]	2,0·10 ⁻³	10,4·10 ⁻³	3,8·10 ⁻³
Легкие [Lungs]	Смерт.+несм. [lethal. + nonlethal]	2,0·10 ⁻³	8,00·10 ⁻³	11,3·10 ⁻³
Молочная железа [Breast]	Смерт.+несм. [lethal. + nonlethal]	2,5·10 ⁻³	3,60·10 ⁻³	6,3·10 ⁻³
Щитовидная железа [Thyroid]	Смерт. [lethal.]	5,0·10 ⁻⁴	1,50·10 ⁻³	1,50·10 ⁻³
	Смерт. [lethal.]	1,0·10 ⁻²	5,0	
Всего [Total]	Смерт.+несм. [lethal. + non lethal.]		6,0·10 ⁻²	5,5·10 ⁻²
	Наследств. [Hereditary]	1,0·10 ⁻²	1,3·10 ⁻²	0,2·10 ⁻²
	Итого [Total]		7,3·10 ⁻²	5,7·10 ⁻²

*красный костный мозг [red bone marrow].

наследственных эффектов (2). Соответствующие коэффициенты номинального риска приняты: (1) – для населения – $5,5 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$ и $4,1 \cdot 10^{-2}$ для персонала; (2) для населения – $0,2 \cdot 10^{-2}$ и $0,1 \cdot 10^{-1}$ – для персонала [1]. Как видно, по сравнению с предыдущими аналогичными оценками [2] наблюдается снижение вышеперечисленных показателей риска (табл. 1). Наиболее значительное снижение (в 6–8 раз) наблюдается в отношении генетических эффектов.

Но, как следует из приведенных данных, в оценке риска происходят разнонаправленные процессы. Так, среди радиочувствительных органов наибольшие изменения коснулись: увеличения риска для МЖ и легких и его снижения для красного костного мозга (ККМ) и гонад, что особенно важно для медицинского облучения.

Таким образом, можно констатировать, что генетические риски облучения первоначально были заведомо завышены и не отражали в полной мере реального воздействия ионизирующего излучения на организм, заведомо переоценивая его (рис. 1). В то же время отдельные соматические риски были недооценены. В настоящее время положение скорректировано.

Следует признать, что сведения о рисках облучения уточняются по мере накопления радиобиологических данных. Тем не менее, необходимо отметить, что в целом показатели индуцируемого риска соответствовали научным представлениям и имели позитивное значение, несмотря на то, что носили консервативный характер.

В этих условиях заслуживают внимания некоторые аспекты радиационной защиты и, в частности, МЖ при РЛИ, в которых она так или иначе попадает в поле излучения. Вначале рассмотрим облучение самой МЖ непосредственно при проведении маммографии, а в дальнейшем изучим ее облучение при других видах РЛИ и,

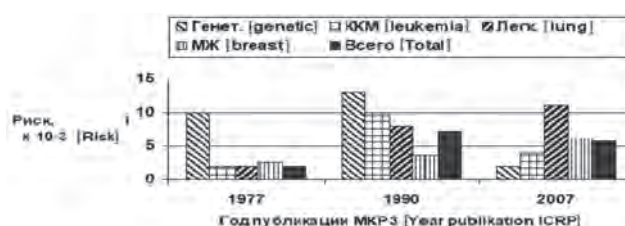


Рис. 1. Изменение представлений о риске облучения различных органов и тканей организма человека ($1 \cdot 10^{-3} \text{ Зв}^{-1}$): наследственных (генетических) эффектах, лейкемии (ККМ), легких и МЖ [1, 4, 5]

[Fig. 1.] Change in the risk of the exposure of different organs and tissues of human body ($1 \cdot 10^{-3} \text{ Sv}^{-1}$): genetic effects, leukemia, lung and breast [1,4,5]

в частности, при наиболее массовом способе исследования – рентгенографии.

2. Изучение заболеваемости молочной железы

В общей структуре онкологической заболеваемости рак МЖ занимает первое место среди всех онкологических заболеваний у женщин (у мужчин на первом месте стоит рак легких) [2]. На долю рака МЖ приходится более 20% всех онкологических заболеваний у женщин (табл. 2). Число доброкачественных заболеваний МЖ в десятки раз превышает соответствующие онкологические показатели. Прогноз в отношении заболеваемости МЖ, так же, как и сама ее динамика, являются неблагоприятными (табл. 3). Об этом же свидетельствует и вся мировая практика [8, 9].

В этих условиях первостепенной проблемой здравоохранения является полномасштабное использование ранней диагностики или профилактики (скрининга) рака

Структура онкологической заболеваемости населения РФ [2]

Таблица 2

Structure of the cancer morbidity for Russian population [2]

[Table 2]

Локализация [Localization]	2010 г. [year]	2015 г. [year]	2010/ 2015 г. [year]
Всего заболеваний, на 100 тыс. чел. [Total diseases, per 100 thousand people]	361,8	402,6	0,90
В том числе легкие [lungs]	39,9	41,2	0,97
Молочная железа* [breast]	74,5	84,8	0,88
Желудок [stomach]	27,8	25,9	1,07
Поджелудочная железа [pancreas]	10,5	12,1	0,87
Прямая кишка [rectum]	17,9	19,8	0,90
Предстательная железа** [prostate]	39,8	57,2	0,70
Шейка матки* [cervix]	45,1	52,5	0,86
Печень [liver]	4,5	5,5	0,82
Пищевод [esophagus]	5,2	5,5	0,95
Мочевой пузырь [bladder]	9,6	10,9	0,88
Почки [kidney]	13,1	18,8	0,70
Лимфатическая и кроветворная ткань [lymph and hematopoietic tissue]	17,1	18,8	0,91

* показатели рассчитаны на женское население [Indicators are calculated for the female population];

** показатели рассчитаны на мужское население [Indicators are calculated for the male population].

Таблица 3

Динамика общей и онкологической заболеваемости женщин за период 2010-2016 гг. [2]

[Table 3]

Dynamic of the general and cancer women morbidity in 2010-2016 [2]

Показатель [Indicator]	2010 г. [year]	2011 г. [year]	2012 г. [year]	2013 г. [year]	2014 г. [year]	2015 г. [year]	2016 г. [year]
Общая заболеваемость, на 100 тыс. чел. [General morbidity, per 100 thousand people]	158.320	160.292	160.415	161.062	160.865	160.056	161.628
В том числе с диагнозом, установленным впервые в жизни [with a diagnosis, established for the first time in life]	78.004	79.687	79.390	79.941	78.711	77.816	78.533
Онкологическая заболеваемость, на 100 тыс. чел. [cancer morbidity, per 100 thousand people]	362	365	367	373	388	403	409
В том числе МЖ [including breast]	74,5	74,9	76,7	91,4	96,2	84,8	87,1

МЖ больших контингентов женщин старших возрастных групп, тем более что в настоящее время установлена четкая зависимость распространения данного заболевания от времени его диагностирования [10].

Приоритетным методом в диагностике рака МЖ является маммография. Роль данного метода особенно велика в диагностике непальпируемых опухолей, что является основной задачей диагностики и профилактики. Кроме того, она позволяет диагностировать другие патологические состояния МЖ: доброкачественные дисплазии, кисты, фиброаденоз и т.п.

Поэтому в условиях высокой радиочувствительности МЖ, с одной стороны, ее высокой заболеваемости, с другой, и возрастающим объемом скрининга рака МЖ, с третьей, следует предпринимать все возможные усилия по ее защите.

Исследование длительной динамики онкологической заболеваемости населения подтверждает вышесказанное (табл. 4). На протяжении нескольких десятилетий наблюдается постоянный рост как всех онкологических заболеваний, так и рака МЖ, причем за это время объемы заболеваний практически удвоились. Данный факт

еще раз подтверждает важность рассматриваемой проблемы.

Единственным способом снизить заболеваемость рака МЖ является проведение скрининга у женщин, который позволяет выявить заболевание на ранних стадиях развития, что с последующим своевременным хирургическим вмешательством способствует увеличению продолжительности жизни больной. Однако, кроме положительных моментов, скрининг имеет и отрицательные: в частности, увеличивает лучевое воздействие на теперь уже «радиочувствительную» МЖ.

3. Исследование маммографии

В настоящее время скрининг рака МЖ в России успешно функционирует. Об этом свидетельствуют высокие показатели частоты (число рентгенологических процедур – РЛП на 1000 женщин, ‰) обследований в последние годы, достигающие 190‰. Для сравнения, в 2000-е гг. данный показатель равнялся 5‰, а в зарубежных странах он был по сравнению с РФ высоким и составлял 43‰ (табл. 5). То есть в России наблюдается значительное (в десятки раз) увеличение маммографических обследований у женщин.

Таблица 4

Долгосрочная динамика заболеваемости населения РФ [2]

[Table 4]

Long-term dynamic of the public morbidity in the Russian Federation [2]

Показатель [Index]	1990 г. [year]	2000 г. [year]	2010 г. [year]	2015 г. [year]
Общая заболеваемость населения, на 100 тыс. чел. [General morbidity, per 100 thousand people]	107.021	131.440	158.320	160.056
В том числе установлена впервые в жизни [including diagnosis, established for the first time in life]	65.121	73.055	78.004	77.816
Включая онкологическую [including cancer morbidity]	264,4	307,7	361,8	402,6
Из них – у мужчин [for men]	284,4	316,8	360,4	398,1
Из них – у женщин [for women]	246,8	299,6	363,1	406,4
В том числе МЖ [including breast]	39,5	57,7	74,5	84,8

Таблица 5
[Table 5]

Долгосрочная динамика количества рентгенологических процедур и маммографических исследований в РФ и в мире
Long-term dynamics of X-ray and mammography examinations in the Russian Federation and in the world]

Регион [Region]	Показатель [Index]	1990 г. [year]	2000 г. [year]	2010 г. [year]	2017 г. [year]
Россия* [Russia]	Число РЛП, % [Number of X-ray procedures]	1260	1180	1530	1910
	В том числе маммография [including mammography]	3,2	5,2	91	190
	Вклад маммографии, % [contribution of mammography %]	0,25	0,4	5,8	9,9
В мире** [In the world]	Число РЛП, % [Number of X-ray procedures]	1240	1700	1950*	–
	В том числе маммография [including mammography]	14	30	43	–
	Вклад маммографии, % [contribution mammography, %]	1,1	1,8	2,2	–

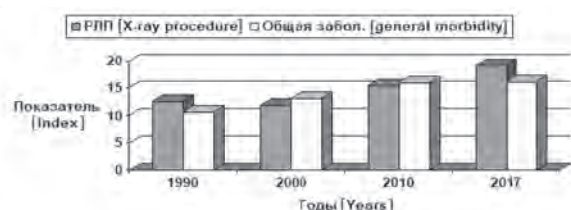
* [3]

Экономически развитые страны в 1997–2007 гг. [8, 9] [economically developed countries 1997-2007 [8, 9]].

Следствием вышесказанного является высокий уровень выявляемости заболеваний раком МЖ, о чем свидетельствует увеличение таких заболеваний в РФ за последние 5 лет всего на 12% (рис. 2) [2].

Следует отметить, что уровень маммографии обусловлен количеством и качеством профессионально подготовленных специалистов и современного оборудования. От их наличия и состояния во многом зависит эффективность проводимой диагностики, а также уровень облучения пациентов и населения. Поэтому обеспечение специалистов соответствующей информацией по радиационному фактору является приоритетной задачей.

а (a)



б (b)

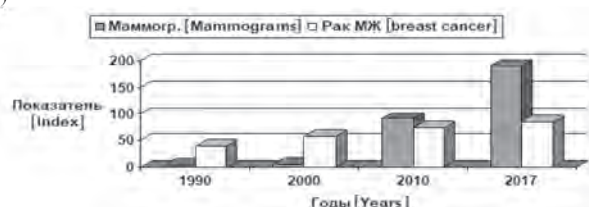


Рис. 2. Долгосрочная динамика: а) общей заболеваемости населения (на 100 тыс. чел.) 10^{-4} и числа РЛП (на 1 тыс. чел.) 10^{-2} ; б) рака МЖ у женщин (на 100 тыс. жен.) и числа маммографий (на 1 тыс. жен.)

[Fig. 2. Long-term dynamic: a) general morbidity of the population (per 100 thousand people) 10^{-4} and frequency of X-ray procedures (per 1 thousand people) 10^{-2} ; b) breast cancer in the women (per 100 thousand women) and number of mammograms (per 1 thousand women)]

В последние годы спектр методов исследования МЖ значительно расширился, в основном за счет ультразвуковых исследований (УЗИ). Появились также принципиально новые томографические методы и, в частности, компьютерная и магнитно-резонансная томографии. Стала шире использоваться радионуклидная диагностика.

Вышесказанное свидетельствует о качественном изменении деятельности отечественной рентгенологии в области диагностики МЖ в последнее время. Значимые изменения в отношении объемов проведения диагностических и особенно профилактических исследований МЖ в России за этот период на фоне высокой онкологической заболеваемости женщин от рака данной локализации свидетельствуют о большом внимании к данной проблеме и стремлении ее решить (табл. 6).

В этих условиях рентгеновский метод (маммография) по-прежнему остается главенствующим при диагностике и профилактике МЖ. Свидетельством тому является тот факт, что число проводимых маммографий в последнее время составило около 25 млн в год, в то время как УЗИ – всего 3 млн. Коллективная ЭД облучения женщин при проведении маммографии за 2010–2017 гг. увеличилась в 2 раза (см. табл. 6). Данные аспекты также свидетельствуют о необходимости совершенствования методов радиационной защиты, включая контроль качества.

4. Определение дозы облучения молочной железы при маммографии

В плане вышесказанного предстояло, в первую очередь, определить уровень медицинского облучения при использовании маммографии. Соответствующие значения доз облучения МЖ, полученные нами при обследовании пациенток данным методом (в разных проекциях), приведены в таблице 7. Из представленных данных видно, что средняя органная поглощенная доза облучения МЖ при проведении одного снимка составляет около 1 миллигрея (0,96 мГр). Аналогичная доза за полное исследование, состоящее из 4 снимков (по 2 на каждую железу

Таблица 6

**Динамика числа рентгенологических исследований и дозы
облучения пациентов за последние годы по данным ЕСКИД [5]**

[Table 6]

Dynamics of X-ray examinations and patient doses in last years, according to ESKID [5]

Показатель [Index]	2010 г. [year]	2011 г. [year]	2012 г. [year]	2013 г. [year]	2014 г. [year]	2015 г. [year]	2016 г. [year]	2017 г. [year]	2018 г. [year]
Число РЛП, на 1000 чел. (‰) [Number of X-ray procedures per 1000 people]	1575	1660	1680	1750	1650	1860	1870	1910	1900
В том числе маммография [including mammography]	91,1 (46,6)*	98,0 (51,2)	117 (63,1)	151 (91,5)	147 (164)	172 (107)	176 (112)	138 (124)	190 (125)
Коллективная ЭД, тыс. чел.-Зв [Collective effective dose, thousand man-Sv]	78,7	81,4	77,6	63,5	66,0	68,4	72,1	77,0	79,6
В том числе маммография [including mammography]	1,17	1,22	1,42	1,78	1,89	2,00	1,31	1,59	2,07
Средняя индивидуальная доза, мЗв/проц. [Average individual dose, mSv/proc.]	0,27	0,27	0,27	0,26	0,27	0,27	0,28	0,30	0,31
В том числе маммография [including mammography]	0,08	0,08	0,08	0,12	0,07	0,08	0,07	0,08	0,07

* В скобках – скрининг [in brackets – from screening].

Таблица 7

Средние дозы облучения молочной железы у женщин при проведении маммографии *

[Table 7]

Average breast doses in mammography *

Размер МЖ, см ¹ [Breast size, cm ¹]	Проекция [Projection]	Органная доза МЖ, мГр [Breast dose, mGy]		ЭД за процедуру/исследование, мЗв [Effective dose per procedure/ /examination, mSv]	
		За 1 процедуру [for 1 X-ray procedure]	За 1 исследование [for 1 examination]	МКРЗ №60 [2] [ICRP №60]	МКРЗ №103 [1] [ICRP №103]
2	Прямая [frontal]	0,76±0,25	1,52	0,04±0,01/0,08	0,10/0,20
	Косая [axial]	0,86±0,25	1,72	0,04±0,01/0,08	0,10/0,20
	Всего [total]	1,62	3,24	0,07/0,14	0,17/0,34
4	Прямая [frontal]	0,78±0,25	1,56	0,04±0,01/0,08	0,10/0,20
	Косая [axial]	0,87±0,28	1,74	0,04±0,01/0,08	0,10/0,20
	Всего [total]	1,65	3,30	0,08/0,16	0,19/0,38
6	Прямая [frontal]	1,02±0,30	2,04	0,05±0,02/0,10	0,12/0,24
	Косая [axial]	1,02±0,36	2,04	0,05±0,02/0,10	0,12/0,24
	Всего [total]	2,04	4,08	0,10/0,20	0,24/0,48
8	Прямая [frontal]	1,20±0,42	2,40	0,07±0,03/0,14	0,17/0,34
	Косая [axial]	1,47±0,47	1,94	0,07±0,04/0,14	0,17/0,34
	Всего [total]	2,67	5,34	0,14/0,28	0,34/0,68
В среднем [Average]	Прямая [frontal]	0,88	1,76	0,05/0,10	0,12/0,24
	Косая [axial]	1,04	2,08	0,05/0,10	0,12/0,24
	Всего [total]	1,92	3,84	0,10/0,20	0,24/0,48

*СПб, 2017 г., ¹толщина компрессии [*Saint Petersburg, 2017, ¹thickness of compression].

в 2 проекциях), равняется 3,84 мГр. ЭД за исследование по [4] равняется 0,20 мЗв, а если применить взвешивающие тканевые коэффициенты из [1], то ЭД увеличивается до 0,48 мЗв. Это вполне существенная доза, соизмеримая по лучевой нагрузке, например, с обследованием грудных позвонков, учитывая еще и то обстоятельство, что облучение МЖ проводится при низком напряжении [6, 11]. Принципиальных различий в дозе между цифровыми и современными аналоговыми маммографами нами не выявлено.

Помимо собственных исследований, были проанализированы данные по числу маммографий и дозам облучения МЖ при проведении маммографии, полученные в форме статистического наблюдения 3-ДОЗ за 2017 г. для РФ. Соответствующие сведения приведены в таблице 8.

Как видно, в настоящее время объем маммографии в России составляет 28 тыс. РЛП (190 ‰). Более половины проводимых РЛП (65%) являются профилактическими. Соотношение пленочных и цифровых аппаратов составляет 2:1. Средняя ЭД в РФ за процедуру равняется 0,08 мЗв. Имеется незначительная разница между пленочным и цифровым методами – 0,09 мЗв и 0,06 мЗв соответственно. Различия в дозе в РФ по сравнению с Санкт-Петербургом, видимо, объясняются разнообразием используемой аппаратуры и большим сроком ее эксплуатации. В целом, данные и Санкт-Петербурга, и РФ подтверждают имеющийся относительно невысокий уровень облучения пациенток при маммографии.

5. Определение дозы облучения молочной железы при различных рентгенологических исследованиях

Максимально МЖ облучается при ее нахождении в прямом пучке излучения при разных видах исследования (рентгенография, рентгеноскопия, компьютерная томография и др.). Нас в первую очередь интересуют рент-

генографические процедуры (рентгеновские снимки), поскольку именно при них возможно, в первую очередь, обеспечить радиационную защиту пациенток в плане оптимизации уровня облучения. Изучение прочих видов исследования должно составить предмет дальнейшей работы.

Оказалось, что маммография составляет около 10% от всех проводимых РЛИ в рентгенодиагностике и при этом обуславливает 2,5% от всей коллективной ЭД облучения населения в настоящее время (см. табл. 6). Среди различных РЛИ, сопровождающихся облучением МЖ, помимо маммографии, основными являются исследования костей скелета (в основном позвоночника), различные виды исследования легких (рентгеноскопия, рентгенография и флюорография), а также исследования брюшной полости.

При облучении МЖ следует иметь в виду, что по своему месту расположения она занимает очень невыгодное с точки зрения дозоформирования положение – находится почти в центре туловища человека в проекции легких, то есть в той его части, на которую приходится большинство исследований лучевой диагностики и закрыть (защитить) которую не всегда представляется возможным.

Действительно при большинстве РЛИ МЖ попадает либо в прямой пучок излучения (исследования позвоночника, ребер и других костей скелета в прямой, а также в боковых проекциях), либо в рассеянное излучение (экранируются другими органами, например, легкими при исследовании органов грудной клетки). Таким образом, МЖ подвергается облучению во многих случаях.

Поскольку МЖ в той или иной степени облучается не только при маммографии, но и при других РЛИ, представляло интерес определить дозы ее облучения в данных ситуациях. Для этого прежде всего были необходимы сведения о подобных исследованиях. Соответствующая информация была получена и представлена в виде чис-

Дозы облучения женщин при проведении маммографии по данным официальной статистики*

Таблица 8

[Table 8]

Effective doses from mammography, based on the official statistical data *

Показатель [Indicator]	Аналоговый метод [Analogue X-ray units]			Цифровые аппараты [Digital X-ray units]			Всего [Total]		
	Диагностика [Diagnostics]	Скрининг [Screening]	Всего [Total]	Диагностика [Diagnostics]	Скрининг [Screening]	Всего [Total]	Диагностика [Diagnostics]	Скрининг [Screening]	Всего [Total]
Число РЛП, тыс. шт. [The number of X-ray procedures, thousand]	5454	12 588	18 042	4431	5658	10 089	9885	18 246	28 131
Коллективная доза, чел.-Зв [Effective collective dose, man-Sv]	476	1115	1591	322	299	621	798	1414	2212
Средняя индивидуальная доза, мЗв/проц. [Average individual dose, mSv / proc.]	0,08	0,09	0,09	0,07	0,05	0,06	0,08	0,08	0,08

* Форма 3-ДОЗ РФ за 2017 г.; ¹коллективная доза; ²средняя индивидуальная доза за процедуру [Form 3-DOS of the Russian Federation for 2017; ¹collective dose; ²average individual dose per procedure].

ленных значений в таблице 9. В первую очередь нас интересовали рентгенографические РЛП, поскольку они составляют большинство РЛИ и именно при них возможно, во-первых, использовать физическую защиту для МЖ в виде применения рентгенозащитных фартуков или изделий из рентгенозащитной резины, и во-вторых, здесь в первую очередь возможна оптимизация облучения с целью снижения уровня облучения МЖ.

Как видно из представленных данных, вклад рентгеновских снимков среди всех РЛП действительно в РФ в 2017 г. составил 67,3%, то есть большинство [3]. Поскольку речь идет об облучении женщин, то целесообразно рассматривать статистику по отношению именно к данной категории населения, а вклад женщин в объем РЛП примерно равен мужскому и составляет: для исследований легких – 41,2%; костей скелета – 50,4%; органов брюшной полости – 58,1%; почек – 56,0% среди исследований данной

локализации [12]. На основании данных о количестве РЛП и РЛИ, а также с учетом ранее полученной информации [13] была составлена структура РЛП с учетом использования различных проекций (см. табл. 9).

Данный подход позволил определить средние organные дозы МЖ и ЭД облучения у женщин. Соответствующие сведения приведены в таблице 10. Из представленных данных видно, что средняя organная доза МЖ, индуцируемая от всех рентгенографических процедур, составляет: в прямой проекции – 1,57 мГр (в диапазоне от 0,20 мГр до 3,31 мГр для разных локализаций исследований) и в боковой – 2,91 мГр (в диапазоне от 0,51 мГр до 9,29 мГр).

Как видно, дозы в боковой проекции почти в два раза выше, чем в прямой. Для сравнения, аналогичные величины доз для маммографии составляют 0,88 мГр и 1,04 мГр соответственно. То есть organные дозы МЖ от различных РЛИ значительно выше, чем при маммографии: в пря-

Таблица 9
Число рентгенологических исследований, сопровождающихся облучением молочной железы у женщин*

[Table 9]

Data on the X-ray examinations, associated with the exposure of breast*

Органы и части тела [Organ and body parts]	Количество всех РЛИ в лучевой диагностике, тыс. шт. (частота РЛИ, %) [The number of all examination in diagnostic radiology, thousand (frequency of X-ray exam., %)]	Количество всех РЛП, тыс. шт. (частота РЛП, %) [The number of all X-ray procedures, thousand (frequency of procedures, %)]	Количество рентгенографий, тыс. шт. (частота рентгенографий, %)¹ [Number of radiography, thousand. (frequency of radiography, %)¹]		Сочетание проекций рентгенографий [Combination projections radiography]
			Всего [Total]	У женщин [Among women]	
Легкие [Lung]	102,371 (697)	123,598 (842)	120,019 (818)	49,447² (628)	0,55 ЗП³ + 0,45 Б⁴
Череп [Skull]	12,816 (87)	16,450 (112)	12,284 (84)	6,191 (78)	0,55 ПЗ⁴ / ЗП + 0,45 Б
Шейный отдел позвоночника [Cervical spine]	3,606 (25)	6,696 (45)	6,436 (44)	3,243 (41)	0,56 ЗП + 0,44 Б
Маммография [Mammography]	9,703 (66)	28,130 (192)	28,131 (191)	28,131 (191)	0,50 П⁶ + 0,50 К⁷
Грудной отдел позвоночника [Thoracic spine]	2,493 (17)	4,417 (30)	4,137 (128)	2,085 (26)	0,60 ПЗ + 0,40 Б
Ребра, грудина [Ribs, Sternum]	1,641 (11)	2,070 (14)	2,060 (14)	1,038 (13)	1,0 ПЗ
Брюшная полость [Abdomen]	3,041 (21)	3,817 (26)	2,075⁸	1,205 (14)	1,0 ЗП
Поясничный отдел позвоночника [Lumbar spine]	4,675 (32)	8,112 (55)	5,938 (40)	2,992 (38)	0,80 ПЗ + 0,20 Б
Таз, крестец [Pelvis, sacrum]	3,816 (26)	5,024 (34)	4,530 (31)	2,283 (29)	0,84 ПЗ + 0,16 Б
Урография [Urography]	2,022⁹	3,625 (25)	3,083 (31)	1,726 (22)	1,0 ЗП
ВСЕГО [Total]	146,184 (996)	201,939 (1375)	188,693 (1285)	92,460 (1173)	–
Все РЛП/РЛИ⁸ [All X-ray procedures / examinations]	199,272 (1357)	280,073 (1908)	266,542 (1816)	130,605 (1657)	–

*Форма 3-ДОЗ РФ 2017 г.; ¹число РЛП на 1000 человек; ²среди женщин; ³ЗП: заднее-передняя проекция; ⁴Б: боковая проекция; ⁵ПЗ: передне-задняя проекция; ⁶П: прямая проекция; ⁷К: косая проекция; ⁸все РЛП включают конечности; ⁹СанПиН 2.6.12523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009».

[*statistic № 3-DOS Russia, 2017; ¹the number of X-ray per 1000 man; ²among women; ³PA projection; ⁴lateral projection; ⁵AP projection; ⁶frontal projection; ⁷axial projection; ⁸all X-ray include limbs; ⁹Sanitary rule 2.6.1.2523-09 «Standard of radiation safety SRS-99/2009»].

Средние organные дозы облучения молочной железы и эффективные дозы у женщин при проведении рентгенографических процедур*

Исследования [Examination]		Органная доза МЖ, мГр [Breast organ dose, mGy]		Коллективная органа доза МЖ¹, тыс. чел.-Гр** [Collective breast organdose, thousand man-Gy]	Средняя эффективная доза (ЭД), мЗв [Average effective dose (E), mSv]							
		МКРЗ № 60 [ICRP №60]			МКРЗ № 103 [ICRP №103]							
		Передне- задняя проек- ция [AP projection]	Боковая проекция [Lat projection]		В сред- нем [aver- age]	Передне- задняя проекция [AP projection]	Боковая проекция [Lat projection]	В среднем [average]	Коллективная ЭД¹, тыс. чел.-Зв** [Collective E, thousand man-Sv]			
Легкие² [Lung]	0,20±0,06²	0,80±0,31	0,47	23,2 (25,0)	0,03±0,01	0,07±0,01	0,05	2,5 (26,0)	0,05±0,01	0,08±0,02	0,06	3,0 (26,1)
Череп [Skull]	1,09±0,44	0,51±0,41	0,83	5,1 (5,5)	0,02±0,01	0,02±0,01	0,02	0,1 (1,1)	0,04±0,01	0,04±0,02	0,04	0,3 (2,6)
Шейный отдел позвоночника [Cervical Spine]	0,68±0,27²	1,07±0,40	0,85	2,8 (3,0)	0,01±0,004	0,05±0,01	0,03	0,1 (1,1)	0,02±0,006	0,05±0,02	0,03	0,1 (0,9)
Маммография [Mammography]	0,88±0,31³	1,04±0,34⁴	0,96	27,0 (29,1)	0,05±0,02	0,05±0,02	0,05	1,4 (14,7)	0,12±0,05	0,12±0,05	0,12	3,4 (29,6)
Грудной отдел позвоночника [Thoracic spine]	1,81±0,50	4,73±1,57	2,98	6,2 (6,7)	0,44±0,22	0,21±0,08	0,35	0,7 (7,4)	0,49±0,25	0,25±0,09	0,40	0,8 (7,0)
Рёбра, грудина [Ribs, sternum]	0,98±0,31	–	0,98	1,0 (1,1)	0,12±0,04	–	0,12	0,1 (1,1)	0,15±0,06	–	0,12	0,1 (0,94)
Брюшная полость [Abdomen]	2,12±0,81²	–	2,12	4,4 (4,7)	0,40±0,17	–	0,40	0,4 (4,2)	0,40±0,18	–	0,40	0,5 (4,3)
Поясничный отдел позвоночника [Lumbar spine]	3,31±0,85	9,29±2,61	4,57	13,7 (14,7)	0,67±0,19	0,53±0,13	0,64	1,9 (26,0)	0,65±0,19	0,48±0,12	0,61	1,8 (15,7)
Таз, крестец [Pelvis, sacrum]	2,63±0,76	–	2,63	6,0 (6,5)	0,81±0,25	–	0,81	1,9 (20,0)	0,52±0,165	–	0,52	1,2 (10,4)
Урография [Urography]	2,03±1,09²	–	2,03	3,5 (3,8)	0,23±0,13	–	0,23	0,4 (4,2)	0,20±0,11	–	0,20	0,3 (2,6)
В среднем/ ВСЕГО % [Average/ TOTAL, %]	1,57	2,91	1,84	92,9 (100)	0,28	0,16	0,27	9,5 (100)	0,26	0,17	0,25	11,5 (100)

*Форма 3-ДОЗ РФ 2017 г.; ** в скобках – вклад в коллективную дозу, %; †среди женщин; ‡задне-передняя проекция; §прямая проекция; ¶косая проекция; [*statistics № 3-DOS Russia, 2017; *** in brackets – contribution to the collective dose, %; †among women; ‡PA projection; §frontal projection; ¶axial projection].

мой проекции в среднем в 2 раза (до 3 раз), в боковой – в 3 раза (до 9 раз) (рис. 3).

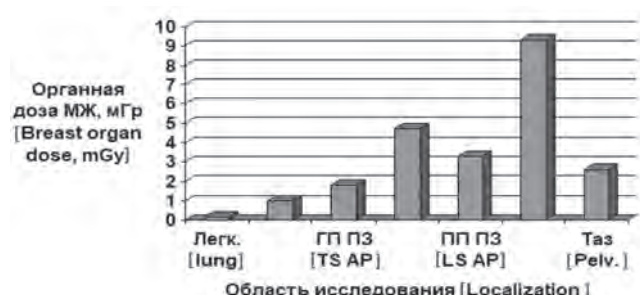


Рис. 3. Органная доза облучения МЖ у женщин при проведении РЛИ: легких, маммографии, грудных позвонков в передней (ГП ПЗ) и боковой (ГП Б) проекциях, поясничных позвонков в передней (ПП ПЗ) и боковой (ПП Б) проекциях, костей таза

[Fig. 3. Breast organ doses during X-ray: lung, mammography, thoracic spine in anterior (AP) and lateral L) projections, lumbar spine in anterior (AP) and lateral (L) projections, pelvis]

Наибольшие дозы на МЖ наблюдаются при исследовании грудного (в среднем 2,98 мЗв) и поясничного (в среднем 4,57 мЗв) отделов позвоночника, особенно в боковой проекции – 4,73 мЗв и 9,29 мЗв соответственно. Высокие дозы наблюдаются также при снимках брюшной полости (2,12 мЗв) и таза (2,63 мЗв) и даже при исследовании почек (2,03 мЗв). В целом, высокие значения доз объясняются повышенными параметрами исследования и, в частности, экспозиции и размера поля.

Облучение МЖ у женщин характеризуется коллективной поглощенной дозой, равной 93 тыс. чел.-Гр. При этом по одной ее трети приходится на маммографию, исследования легких, а также позвоночника. Следует отметить, что высокие коллективные дозы облучения МЖ при РЛИ легких объясняются большим количеством проводимых здесь РЛП.

Смена ориентиров радиационной безопасности с учетом современных радиобиологических сведений о рисках облучения населения ионизирующим излучением с использования публикации № 60 на № 103 МКРЗ в плане медицинского облучения, как видно из данных таблицы 10, в одних случаях будет способствовать снижению средней ЭД облучения пациентов, а в других – их увеличению. Это будет происходить, в частности, благодаря разнонаправленным изменениям радиобиологических показателей (см. п. 1).

В частности, изменение ЭД при замене взвешивающих тканевых коэффициентов с публикации МКРЗ № 60 на № 103 будет сопровождаться увеличением дозы для органов, расположенных в верхней части туловища, – легких и МЖ из-за увеличения риска их облучения и одновременно снижения ЭД для органов, расположенных в нижней части туловища, – поясничных позвонков, таза, и др. из-за уменьшения риска облучения КМ.

В рассматриваемых нами случаях доза облучения МЖ, в первую очередь, зависит от условий проведения РЛП и, в частности, от параметров исследования, среди которых основными являются: напряжение на рентгеновской трубке, экспозиция и размер поля облучения. Поэтому

в плане радиационной защиты пациенток следует оптимизировать именно эти показатели. Исследования показывают, например, что уменьшение размера поля облучения при исследовании грудного отдела позвоночника до 15×40 см, а также использование низкой экспозиции (10 мАс) позволяет значительно снизить органную дозу на МЖ до 0,20 мГр против 3,75 мГр (в 19 раз!) при поле 30×40 см и экспозиции 60 мАс.

Практическую реализацию защиты МЖ можно также осуществить, закрыв их рентгенозащитной резиной (или изделием из нее) во время проведения РЛИ в той или иной проекции (особенно в боковой), не закрывая при этом область исследования. Более того, оказалось, что МЖ также следует закрывать при исследовании нижней части туловища и, в частности, при исследовании органов брюшной полости и таза.

Заключение

Причина, по которой авторы взялись за данное исследование, вполне логична, поскольку, как было показано выше, ситуация с онкологической заболеваемостью вообще и МЖ в частности ухудшается, и соответственно, ее рентгенодиагностическое обеспечение сопровождается постоянным и значимым увеличением лучевой нагрузки, особенно в последнее время, а увеличение радиочувствительности МЖ является свершившимся фактом. Поэтому и было принято решение исследовать данный вопрос, акцентируя внимание на его радиационно-гигиеническом аспекте. При этом важность проблемы заключается в поиске путей скорейшего ее решения.

В ходе исследования было показано, что рак МЖ у женщин занимает первое место среди всех онкологических заболеваний и постоянно растет. В этом аспекте проводится его профилактика, сопровождающаяся облучением МЖ. В то же время, согласно данным публикации № 103 МКРЗ, МЖ впервые была отнесена к наиболее радиочувствительным органам [1], то есть при облучении она подвергается максимальному риску, наряду с КМ, легкими, толстым кишечником и желудком. Это означает, что в медицинской рентгеновской диагностике МЖ в первую очередь нуждается в радиационной защите (как ранее гонады, которые тем же документом отнесены к менее радиочувствительным органам). То есть, с одной стороны мы должны широко использовать рентгеновское излучение для диагностики и профилактики заболеваний МЖ, а с другой – должны ее защищать.

На первый взгляд, наблюдается неразрешимая ситуация, но давайте посмотрим на нее с практической точки зрения. Маммография не страшна, поскольку она сопровождается незначительной (для исследований, связанных с онкологическими заболеваниями) дозой облучения, а при исследовании скелета и других органов нужно просто оптимизировать уровень облучения МЖ, прежде всего, по возможности, закрывать ее рентгенозащитным фартуком, в первую очередь в боковой проекции. До настоящего времени такой постановки вопроса не существовало, поскольку МЖ не относилась к наиболее радиочувствительным органам [14].

В результате исследований было определено, что МЖ, находясь практически в центре туловища женщины, при большинстве РЛИ попадает либо в прямой пучок излучения (исследования костей скелета), либо в рассеянное излучение при экранировании туловищем, на-

пример, в исследованиях органов грудной клетки. Во всех случаях МЖ в той или иной степени подвергается облучению. Среди различных локализаций обследования пациенток и облучения МЖ можно выделить основные: исследования скелета (в основном позвоночника), различные виды исследования легких (рентгенография, флюорография и др.), а также исследования брюшной полости.

Максимальное облучение МЖ получает при нахождении ее в прямом пучке излучения. Наши исследования показали, что средняя органная доза на МЖ при рентгенографии составляет 1,84 мГр, обуславливая дозу в передне-задней проекции 1,57 мГр и в боковой 2,91 мГр. Это намного выше, чем при маммографии, – 0,96 мГр, 0,88 мГр и 1,04 мГр соответственно. Максимальные дозы наблюдаются при исследовании грудного (4,73 мГр) и особенно поясничного отделов (9,29 мГр) позвоночника, выполненных в боковой проекции. Существенны также дозы на брюшную полость (2,12 мГр), почки (2,03 мГр) и таз (2,63 мГр) в прямой проекции.

Данный факт свидетельствует о существенном уровне облучения МЖ в результате прямого облучения при проведении различных РЛИ, в том числе органов нижней части туловища человека. Основной причиной здесь, видимо, является использование неоптимальных параметров исследования и, в первую очередь, высоких значений экспозиции и поля облучения.

Следует учитывать и снижать также дозы, полученные при исследовании органов верхней части туловища, в частности, легких. В первую очередь это стоит делать в прямом пучке в боковой проекции. Именно здесь МЖ нужно закрывать, но защищать необходимо и в рассеянном излучении, например, с помощью оптимизации условий облучения.

Нужно понимать, что аналогичные дозы на МЖ при специальных РЛИ, таких как компьютерная томография и интервенционные исследования, будут существенно выше, чем в рассматриваемых случаях, что, во-первых, требует использования здесь методов обоснования и оптимизации, а во-вторых, данный вопрос нуждается в дальнейшем изучении.

Вышесказанное свидетельствует о необходимости защиты МЖ по мере возможности при проведении РЛИ, включая исследования костей скелета и органов брюшной полости, дозы при которых сами по себе являются весьма существенными (для грудных позвонков средняя ЭД равняется 0,40 мЗв, для поясничных позвонков – около 0,70 мЗв за процедуру, для брюшной полости – 0,40 мЗв).

Как видно, для защиты МЖ, в первую очередь, необходимы типичные меры радиационной защиты пациенток, в том числе оптимизация, включая использование физической защиты, например, в виде разнообразных по форме рентгенозащитных материалов. Как было показано, физическая защита возможна, в первую очередь, при использовании боковых проекций при различных РЛИ.

Следует отметить, что пожизненный атрибутивный радиационный риск смертности женщин старше 35 лет от рака МЖ при проведении маммографии составляет $6,4 \cdot 10^{-6}$ отн. ед. и находится в области пренебрежимого риска – $< 10^{-6}$ (менее 1 случая на миллион человек) [14]. Увеличение органной дозы МЖ на порядок величины при проведении различных РЛИ, как было показано в прове-

денных исследованиях, способствует повышению значений пожизненного риска в 10 раз, и он перемещается в область минимального риска – 10^{-6} – 10^{-5} (от 1 до 10 случаев на миллион человек), что еще раз подтверждает необходимость радиационной защиты МЖ пациенток в рентгенодиагностике.

Выводы

1. Среди различных онкологических заболеваний рак молочной железы у женщин занимает первое место (составляя 85 на 100 тыс. чел.) и постоянно увеличивается (за 10 лет в 2 раза), намного опережая другие локализации. В этих условиях объем маммографии у женщин за 10 лет увеличился в 2 раза (профилактических в 3 раза) и достиг значения 190%, при этом размеры скрининга составляют 65,6%.

2. Средняя органная доза облучения молочной железы при маммографии составляет: за один снимок – 0,88 мГр, профилактическое исследование – 1,76 мГр, диагностическое исследование – 1,92 мГр. Средняя эффективная доза равна: за снимок – 0,05 мЗв, профилактику – 0,10 мЗв, диагностику – 0,20 мЗв. Коллективная эффективная доза за последние 7 лет выросла в 2 раза.

3. По современным радиобиологическим представлениям [1], риск облучения молочной железы увеличивается в 1,75 раза по сравнению с используемым в отечественной практике. С учетом новых взвешивающих тканевых коэффициентов, эффективная доза увеличивается в 2,4 раза и достигает значения: за снимок – 0,12 мЗв, профилактику – 0,24 мЗв, диагностику – 0,48 мЗв.

4. Коллективная органная доза от маммографии равняется 27 тыс. чел.-Гр, что составляет 30% дозы от всех рентгенографических процедур. Коллективная эффективная доза от маммографии равна 1,4 тыс. чел.-Зв (15% от всей дозы). Коллективная эффективная доза молочной железы, с учетом увеличения взвешенных тканевых коэффициентов, будет равна 3,4 тыс. чел.-Зв, что составит 30% от всей дозы.

5. Существенное облучение молочной железы обуславливают рентгенографические процедуры: средняя органная доза на МЖ за один снимок составляет 1,84 мГр, обуславливая дозу в передне-задней проекции 1,57 мГр и в боковой 2,91 мГр. Максимальные дозы наблюдаются при исследовании грудного (4,73 мГр) и особенно поясничного отделов (9,29 мГр) позвоночника, выполненных в боковой проекции. Существенны также дозы при снимках брюшной полости (2,12 мГр), почек (2,03 мГр) и таза (2,63 мГр) в прямой проекции. Коллективная органная доза молочной железы от рентгеновских снимков (без учета маммографии) равна 65,9 тыс. чел.-Гр (70% от всех рентгенографических процедур),

6. В условиях высокой заболеваемости МЖ и большого количества маммографий, с одной стороны, ее повышенной радиочувствительности и существенных доз при различных рентгенологических процедурах – с другой, необходимы дополнительные меры радиационной защиты молочной железы у женщин при проведении рентгенологических исследований, отсутствующие в настоящее время, и, в частности, оптимизация дозы и контроль качества. Следует по возможности закрывать молочную железу рентгенозащитной резиной или изделием из нее, в первую очередь – в боковых проекциях.

Литература

1. МКРЗ. Рекомендации 2007 г. Международной комиссии по радиационной защите. Публикация 103 МКРЗ. М.: Изд-во ООО ПКФ «Алана», 2009. 312 с.
2. Форма статистического наблюдения №3-ДОЗ «Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских диагностических рентгенорадиологических исследований в РФ за 2017г.» Утв. №411 Росстатом.
3. МКРЗ. Радиационная защита. Публикация 26 МКРЗ. Международная комиссия по радиологической защите. М.: Атомиздат, 1978. 87 с.
4. МКРЗ. Рекомендации Международной комиссии по радиологической защите 1990 года. Публикация 60 МКРЗ. М., Энергоатомиздат, 1994. 192 с.
5. Здравоохранение в России. 2017: Стат. сб. Росстат. М., 2017. 170 с.
6. Методические указания МУ 2.6.1.2944-11 Контроль доз облучения у пациентов при проведении рентгенодиагностических медицинских исследований.
7. Tapiovaara M., Lakkisto M., Servomaa A. PCXMC: A PC-based Monte Carlo program for calculating patient doses in medical x-ray examinations. Report STUK-A139, 2nd Edition. Helsinki, Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety, 2008.
8. UNSCEAR. Sources and Effects of Ionising Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume I, Annex B. -New York, UN, 2000.
9. UNSCEAR. Sources and Effects of Ionising Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume I, Annex A. - New York, UN, 2010.
10. Белавина Е.А. Организационно-методическое обеспечение лучевой диагностики и профилактики рака молочной железы у женщин в Санкт-Петербурге: автореф. дис. ... канд. мед. наук. СПб, 2006. 22 с.
11. Balonov M., Golikov V., Zvonova I., et al. Patient doses from medical examinations in Russia: 2009-2015 // J. Radiol. Prot. 2018. Vol. 38. P. 121-139. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/aa9b99>
12. Власова М.М. Научное обоснование организации службы лучевой диагностики и лучевой терапии в условиях отдельного региона в период реорганизации здравоохранения: автореф. дис. ... докт. мед. наук. СПб., 2001. 37 с.
13. Никитин В.В., Ермаков И.А., Жербин Е.А. и др. Оценка популяционных доз от рентгенодиагностических процедур в СССР (1970-1980 гг.). М.: ЦНИИАтоминформ. 1986. -25с.
14. Методические рекомендации МР 2.6.1.0098-15. Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенорадиологических исследований. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2015. 42 с.

Поступила: 24.10.2019 г.

Кальницкий Сергей Анатольевич – кандидат биологических наук, ведущий 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. г. Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: s.kalnitsky@niirg.ru

Ладанова Евгения Романовна – аспирант, младший научный сотрудник лаборатории радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Кальницкий С.А., Ладанова Е.Р. Риск, уровни облучения и меры радиационной защиты молочной железы у женщин при проведении рентгенографических процедур // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 110–122. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-110-122

Exposure of the breast, corresponding radiation risks and radiation protection for women, undergoing conventional X-ray examinations

Sergey A. Kalnitsky, Evgenia R. Ladanova

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 purpose of this work is to investigate radiation protection of the female breast in different X-ray examinations, including radiography. It is actual, because Publication ICRP №103 takes female breast to

Sergey A. Kalnitsky

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

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

maximum irradiating organs. Analysed: risk of ionizing radiation, FB cancer, volume and dynamics X-ray examinations, female breast organ dose and effective dose. In conformity with data of Publication ICRP №103, effective dose of patients at mammography increased in 2,4 time and reach 0,48 mSv for examination as compared with 0,20 mSv with data of Publication ICRP №60. It is shown, that among different cancer, female breast cancer takes first place and constancy increased. Quantity of mammograms for 10 years increased in 2 time and collective dose increased in 2 times at last 7 years. Female breast average organ dose in mammography is 0,96 mGy and effective dose 0,05 mSv. It is only a part of summary irradiation from all X-ray examinations. The average mean value female breast organ dose of all radiography is 1,84 mGy (anterio-posterior projection – 1,57 mGy, lateral – 2,91 mGy) and effective dose – 0,25 mSv (anterio-posterior – 0,26 mSv, lateral – 0,17 mSv). Considerable female breast irradiation is caused by X-ray spine examinations (thorax and lumbar). It is necessary to ensure radiation protection of female breast in diagnostic radiology, including quality control and optimization. Also need to shut female breast by X-ray protection apron, particularly in the lateral projection.

Key words: *diagnostic radiology, X-ray exposure, women, breast, cancer, mammography, organ absorbed dose, risk, effective dose, radiation protection, optimization, quality control.*

References

1. ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: translation from English. Edited by M.F. Kiselev, N.K. Shandala. Moscow: Alana, 2009. 312 p. (In Russian)
2. The information about patients radiation doses during medical X-ray examinations. State statistical report. Form No. 3-DOS: approved. Resolution of the Goskomstat of Russia. Moscow, 2017. (In Russian)
3. ICRP Publication 26. Radiation Protection. Recommendations of the ICRP. Ann. Moscow. Atomizdat; 1978: 87 p. (In Russian)
4. ICRP Publication 60. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Publication 60 of the ICRP. Moscow: Energoatomizdat; 1994: 192 p. (In Russian)
5. Healthcare in Russia. 2017: Stat.sb. Rosstat. Moscow; 2017: 170 p. (In Russian)
6. Methodological guidelines 2.6.1.2944-11 «Control of radiation doses in patients during medical X-ray examinations.» (In Russian)
7. Tapiovaara M, Lakkisto M, Servomaa A. PCXMC: A PC-based Monte Carlo program for calculating patient doses in medical x-ray examinations. Report STUK-A139, 2nd Edition. Helsinki, Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety, 2008. (In Russian)
8. UNSCEAR. Sources and Effects of Ionising Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume I, Annex B. -New York, UN, 2000.
9. UNSCEAR. Sources and Effects of Ionising Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume I, Annex A. – New York, UN, 2010.
10. Belavina EA. Organizational and methodological support for radiation diagnosis and prevention of breast cancer in woman in Saint-Petersburg. Abstract of Candidate Medical Science. 2006: 22p. (In Russian)
11. Balonov M, Golikov V, Zvonova I, et al. The patient doses from medical X-ray examinations in Russia: 2009-2015. *J. Radiol. Prot.* 2018; 38; 121–139. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/aa9b99>
12. Vlasova MM. The scientific rationale for organization of radiation diagnostics and radiation therapy service in separate region during the health care reorganization. Abstract of Doctor Medicine thesis. Saint-Petersburg; 2001: 37 p. (In Russian)
13. Nikitin VV, Ermakov IA, Zherbin EA, et al. Assessment of the doses of the public from X-ray procedures in USSR in 1970-1980. Moscow: TSNIIatominform; 1986: 25 p. (In Russian)
14. Methodical recommendations 2.6.1.0098-15. Assessment of radiation risk in patients during radiological examinations. Moscow: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor; 2015:42. (In Russian)

Received: 24 October, 2019

For correspondence: Sergey A. Kalnitsky – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher of Protection Laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: s.kalnitsky@niirg.ru)

Evgenia L. Ladanova – Graduate student, Junior Researcher, Protection Laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

For citation: Kalnitsky S.A., Ladanova E.R. Exposure of the breast, corresponding radiation risks and radiation protection for woman, undergoing conventional X-ray examinations *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2020. Vol. 13, No 3. P. 110-122. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-110-122

Методические аспекты обоснования контрольных диагностических уровней облучения пациентов при медицинских рентгенодиагностических исследованиях

М.В. Калинина¹, Т.В. Жукова²

¹Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Ростовской области, Ростов-на-Дону, Россия

²Ростовский государственный медицинский университет, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Ростов-на-Дону, Россия

Оптимизация медицинского облучения путем обоснования reference level пациентов при диагностических медицинских процедурах в условиях отечественного здравоохранения требует гармонизации с международными рекомендациями. В работе изложена история вопроса о разработке reference level по материалам международных и отечественных нормативных документов, обращено внимание на формирование глоссария, представлены возможные пути сбора информации об измеренных уровнях облучения пациентов при рентгенодиагностических исследованиях, полученных на местном, региональном и национальном уровнях.

Ключевые слова: референтный диагностический уровень, контрольный диагностический уровень, указательный уровень медицинского облучения, оптимизация медицинского облучения, радиологическая практика.

В нашей стране обоснование тех или иных ограничений, связанных с диагностическим облучением пациентов, является новым аспектом медицинской практики вообще и медицинской радиологической практики в частности. В связи с этим используемые термины, а также цель установления ограничительных уровней и конкретный механизм их использования должны быть понятны непосредственным участникам процесса, а именно практикующим врачам (клиницистам и рентгенологам). Ориентиром при этом, конечно, являются решения международных правительственных организаций (МКРЗ, НКДАР ООН, МАГАТЭ).

Впервые целесообразность ограничения медицинского облучения с позиций принципа оптимизации прозвучала в 60-й Публикации МКРЗ [1], комиссия рекомендовала рассмотреть применение граничных доз или уровней расследования (investigation level), выше которых должны быть изучены причины увеличения дозы. В дальнейшем в 73-й публикации МКРЗ [2] комиссия выделяла, что reference level является одной из форм уровня исследования, относится к легко измеряемым величинам, как правило, к поглощенной дозе в воздухе или в тканезквивалентном материале на поверхности простого стандартного фантома или представительного пациента. В обоих случаях диагностический reference level предназначен для использования в качестве простого теста для

выявления ситуаций, в которых уровни дозы у пациента или введенная активность необычно высоки или низки. Если будет установлено, что процедуры постоянно приводят к превышению соответствующего диагностического reference level, необходимо провести местный анализ процедур и оборудования, чтобы определить, была ли защита адекватно оптимизирована.

В 103-й Публикации МКРЗ [3] указано, что хотя использовались различные термины как в предыдущих публикациях МКРЗ, так и в глоссарии МАГАТЭ: action level (уровень действий), intervention level (уровень вмешательства), investigation level (уровень расследования), к которому близок по значению guidance level for medical exposure (указательный уровень для медицинского облучения), и recording level (уровень регистрации), комиссия остановилась на трех терминах: «предел дозы», «граничная доза» и «референтный уровень», причем первые два неприменимы в настоящее время к медицинскому облучению населения, а термин «reference level» используется в ситуациях существующего облучения как персонала, так и населения в случае медицинского облучения.

В Дополнительном Руководстве 2 [4] был продолжен обзор различных подходов к установлению референтных диагностических уровней для медицинских задач визуализации. Цель диагностических reference level заключается в том, чтобы помочь избежать дозы у пациента, которая не способствует клинической цели медицинской

Калинина Марина Владимировна

Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Ростовской области

Адрес для переписки: 344019, Россия, Ростов-на-Дону, 18-я линия, 17, E-mail: kalinina@rpnodon.ru

задачи визуализации. Это достигается путем сравнения численного значения национального, регионального или местного диагностического reference level, «среднего или другого соответствующего значения, наблюдаемого на практике у подходящей референтной группы пациентов или подходящего референтного фантома». При этом обращалось внимание, что reference level должен определяться с учетом антропометрических параметров (рост, вес) пациентов, а также технических параметров и представлять собой диапазон значений. Причем этот диапазон должен быть указан в протоколе визуализации и может быть тем уже, чем более хорошую рентгенологическую практику он представляет. В то же время подчеркивалось, что на данном этапе разработки концепции оптимизации медицинского облучения reference level не предполагается использовать для индивидуальной оценки дозовой нагрузки пациента, он предназначен для снижения ненужного риска, связанного со стохастическими последствиями облучения для здоровья.

Как указано в директиве Европейского Союза (Council Directive 97/43/Euratom) [5], диагностические уровни не разделяют медицинскую практику на «плохую» и «хорошую». Они должны служить руководством к тому, что является достижимым при современной образцовой практике на уровне медицинской организации и пересматриваться по мере совершенствования технологий и методов лучевой диагностики, т.е. просматривается аналогия с требованиями по разработке и обоснованию контрольных уровней облучения персонала.

На использование reference level в качестве результата общей оптимизации защиты пациента обращено внимание в 105-й Публикации МКРЗ [6], где отмечено, что это сложная задача, и в целях упрощения на первом этапе внедрения концепции предлагалось выбрать начальное значение как процентильную точку на наблюдаемом распределении дозы у пациентов в определенном диапазоне антропометрических параметров. Причем подчеркнуто, что дозы являются функцией многих факторов, как технических параметров оборудования, так и характеристик пациента, и следовательно, даже при одном и том же виде процедуры могут быть широкие вариации доз у пациентов.

В 105-й публикации МКРЗ [6] были сформулированы руководящие принципы для установки reference level, которые заключались в следующем: четко определить цель обоснования уровня (национальная, региональная или местная), а также степень детализации клинических и технических условий для задачи медицинской визуализации, что будет иметь значение для выбранного значения; величину, используемую для диагностического reference level, можно получить на практике и использовать как меру относительного изменения тканевых доз у пациента.

История внедрения в сознание отечественной медицинской общественности концепции ограничения медицинского облучения началась в 1990 г. В действующих в тот период НРБ-76/87 не было раздела «Ограничение медицинского облучения населения». Однако, по видимому, в целях реализации рекомендаций МКРЗ Министерством здравоохранения был переиздан приказ № 129 «Об упорядочении рентгенологических обследований» (М., 1990). В приложении к приказу имелась таблица дозовых нагрузок на пациентов при проведении рентгенологических исследований в зависимости от выполнен-

ной процедуры и лист учета дозовых нагрузок при рентгенологических исследованиях – вкладыш в «Медицинскую карту амбулаторного больного» (ф. N 025/у-87). Конечно, нельзя эти дозы было назвать «контрольными уровнями» по многим позициям, в первую очередь это были не измеряемые величины.

В НРБ-96 появился раздел «Ограничение медицинского облучения населения», в котором предлагалось руководствоваться «контрольными уровнями медицинского облучения в рентгенологии, радионуклидной диагностики и терапии, лучевой терапии, основанных на лучших стандартах мировой практики». Это противоречило действительности, т.к. установление «контрольных уровней» облучения пациентов в отечественной рентгенодиагностике и терапии не практиковалось.

В следующей редакции НРБ-99 и, соответственно, ОСПОРБ-99 информация о контрольных уровнях не приводилась. Далее были утверждены несколько методических указаний: МУК 2.6.1.760-99 «Определение индивидуальных эффективных доз облучения пациентов при рентгенологических исследованиях с использованием измерителей произведения дозы на площадь», МУК 2.6.1.962-00 «Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований», а затем МУК 2.6.1.1797-03 «Контроль эффективных доз облучения пациентов при медицинских рентгенологических исследованиях» (далее МУК 2.6.1.1797-03), определяющие реальные возможности измерения доз пациентов при общих исследованиях.

В это же время внедрена в практику медицинских организаций форма федерального статистического наблюдения «Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгенорадиологических исследований» (форма 3-ДОЗ), включающая сведения об учёте доз облучения пациентов при рентгенорадиологических исследованиях в виде двух таблиц: «Расчитанные дозы облучения пациентов» и «Измеренные дозы облучения пациентов». Ориентиром для сведений о расчитанных дозах служила таблица «Средние значения эффективных доз для наиболее распространенных рентгенологических процедур с типичными значениями напряжений на рентгеновской трубке и экспозициями, приведенная в МУК 2.6.1.1797-03.

В существующей редакции МУ 2.6.1.2944-11 «Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований» (далее МУ 2.6.1.2944-11) таблица средних величин доз облучения пациентов для наиболее распространенных рентгенологических процедур уже исключена. В то же время в форме 3-ДОЗ по-прежнему фигурируют сведения о дозах, полученных на основании расчета и на основе контроля доз, что не способствует актуализации процедуры измерения доз пациентов. Например, даже в 2017 г. по данным радиационно-гигиенической паспортизации в Ростовской области, инструментальный контроль доз облучения пациентов осуществляется в 65,9% медицинских организаций (МО), причем если в бюджетных МО этот показатель равен 73,4%, то в коммерческих и ведомственных МО он составляет всего 32,1% и 22% соответственно.

Как лингвистическая калька термина «reference level» в отечественной нормативной литературе появился

термин «референтный уровень», который используется в последние годы в вопросах оптимизации диагностического медицинского облучения пациентов. Однако не только смысловой дословный перевод звучит как «контрольный уровень», но термин «контрольный диагностический уровень (КДУ) медицинского облучения пациентов на местном уровне», с одной стороны, понятен как врачам-рентгенологам, так и руководителям МО, которые имеют практический опыт обоснования контрольных уровней облучения персонала и согласования их с государственной санитарно-эпидемиологической службой, а с другой стороны – вполне соответствует сущности задачи оптимизации диагностического облучения пациентов путем обеспечения уровня наилучшей рентгенодиагностической практики.

Термин КДУ совершенно не противоречит термину «контрольный уровень» и может рассматриваться как дальнейшее развитие обеспечения радиационной безопасности при эксплуатации техногенных источников (в данном случае медицинских) применительно к медицинскому облучению населения. Так, например, «целесообразности сохранения уже достигнутого уровня радиационного воздействия на данном объекте ниже допустимого», а также «эффективности мероприятий по улучшению радиационной обстановки» (раздел 3, п.3.13.10 ОСПОРБ 99/2010) вполне применимы к оптимизации медицинского облучения пациентов.

В Глоссарии МАГАТЭ используется термин «guidance level for medical exposure» (указательный уровень для медицинского облучения), который в поле русского языка более соответствует сущности вопроса. Тем не менее, в практике МКРЗ имеется пример унификации терминов, например, «взвешивающий коэффициент излучения» и «взвешивающий коэффициент органов и тканей», которые, как известно, отражают дифференциацию излучений по относительной биологической эффективности и дифференциацию органов и тканей по риску развития стохастических эффектов. В рассматриваемых случаях в новой редакции ОСПОРБ можно сформулировать термины «контрольный уровень профессионального облучения» и «контрольный диагностический уровень медицинского облучения», контрольные уровни техногенного облучения населения, как правило, в настоящее время не обосновываются.

На местном уровне при обосновании КДУ предлагается руководствоваться следующим определением: контрольный диагностический уровень (КДУ) в рентгенодиагностике и радионуклидной диагностике – значения измеряемых величин, установленных для пациентов определенной возрастной группы и типа телосложения при проведении соответствующих процедур с использованием конкретного типа оборудования.

Такой термин, по-нашему мнению, будет понятен непосредственным пользователям терминологии: как персоналу, выполняющему процедуры, так и врачам-клиницистам, назначающим диагностические процедуры, а также санитарным врачам, которые могли бы возглавить работу медицинских сообществ в вопросах оптимизации облучения пациентов. В дальнейшем в рамках данной работы мы будем использовать этот термин (КДУ).

РДУ (КДУ) медицинского облучения пациентов, как и контрольные уровни облучения персонала, согласно тре-

бованиям ОСПОРБ-99/2010 (п 3.13.10), не являются нормативными величинами, при установлении контрольных уровней следует исходить из принципа оптимизации – поддержание на возможно низком и достижимом уровне с учетом экономических и социальных факторов индивидуальных доз облучения и числа облучаемых лиц при использовании любого источника ионизирующего излучения.

Первые опыты обоснования КДУ пациентов в отечественной практике опубликованы к 2010 г. [7–9]. Автор разработала «референтные диагностические уровни» (РДУ) при проведении рентгенографии органов грудной клетки и поясничного отдела позвоночника для МО г. Санкт-Петербурга. Методика была основана на определении 75% квантиля распределения средних индивидуальных эффективных доз облучения «стандартных» по массе тела пациентов. По предложенной методике РДУ указаны не в измеряемых величинах, а в единицах эффективной дозы, т.к. не все использованные аппараты были оснащены измерителями произведения дозы на площадь (ПДП), а в ряде случаев дозы определялись по режимам проведения процедур и радиационному выходу рентгенодиагностического аппарата.

За последующие годы появились и ряд других работ, посвященных проблеме РДУ. Было установлено [10], что при проведении интервенционных процедур (эмболизация аневризм различной локализации, артериовенозных мальформаций, при вертебропластике) дозы, получаемые пациентами, приближаются к возникновению местных детерминированных эффектов. Анализируя различные варианты выбора показателей для обоснования КДУ, авторы [11–14] показали, что нет никаких оснований не использовать ПДП в качестве контролируемого уровня.

В 2012 г. утверждены методические рекомендации МР 2.6.1.0066-12 «Применение референтных диагностических уровней для оптимизации радиационной защиты пациента в рентгенологических исследованиях общего назначения» (далее МР 2.6.1.0066-12), при этом при определении референтного уровня предлагалось руководствоваться МУ 2.6.1.2944-11, в которых отражено, что широко используемыми измеряемыми величинами при проведении рентгенографии являются ПДП (если рентгенодиагностический аппарат снабжен ионизационной камерой) или радиационный выход трубки во всех прочих случаях; при компьютерной томографии – компьютернотомографический индекс дозы.

Между тем МР 2.6.1.0066-12 рекомендовано использовать «значение стандартной дозы или произведение дозы на площадь». Кроме того, предлагалось вычислять входную поверхностную дозу (ВПД) с использованием ряда произвольных коэффициентов, а также включить в программу «многочисленные рентген-аппараты, эксплуатируемые в регионе» и использовать полученные данные при обосновании reference level. Однако в настоящее время используются различные типы рентгенодиагностических установок, как аналоговые, так и цифровые. Последние называются малодозовыми, т.к. обеспечивают на порядок меньшие дозы облучения пациентов. Учитывая, что большинство современных рентгенодиагностических аппаратов снабжены измерителями ПДП, именно этот параметр целесообразно использовать в дальнейшем для обоснования КДУ при выполнении рентгенографии.

В 2013 г. авторы [15] провели исследование, в котором попытались ответить на вопросы, закономерно возникающие при реализации МР 2.6.1.0066-12. Однако неясности остались в главном вопросе: какую дозиметрическую величину использовать в качестве reference level. Что касается входной поверхностной дозы (ВПД), которая также рекомендуется в МР 2.6.1.0066-12 в качестве возможного reference level, справедливо указано, что в отечественных нормативно-методических документах ВПД не фигурирует. Этого, по-видимому, достаточно, чтобы не рассматривать ВД как основу при установлении reference level.

Авторы привели большой фактический материал (рентгенография ОГК у более 1000 пациентов), но при этом выяснили, что только около 20% используемых рентген-аппаратов оснащены «реально функционирующими дозиметрами», т.е. эксплуатируются в неисправном состоянии. Отсюда авторы делают вывод о нецелесообразности использования ПДП для обоснования КДУ. Следует отметить, что в комплектность современного рентгенодиагностического оборудования (не только для проведения рентгеноскопии или компьютерной томографии) входят средства измерения ПДП, а вот приобретение оборудования решается администрацией МО в каждом конкретном случае, с учётом объёмов финансирования.

В 2017 г. были опубликованы исследования, которые, по мнению, авторов [16–17], подводят итог процессу внедрения методологии установления «референтных» диагностических уровней в практику отечественного здравоохранения. Авторы предлагают два метода (групповой и медианный) определения национальных reference level в виде стандартных доз (СД) для стандартного пациента без учета особенностей оборудования (аналоговое или цифровое). Ответственность за сбор исходных данных, а также «за проведение оптимизационных мероприятий» предлагается возложить либо на технический персонал (инженеры, медицинские физики, сотрудники службы радиационной безопасности), либо на персонал лабораторий радиационного контроля.

Однако по всем этим позициям возникают вопросы. Во-первых, в условиях нашей страны насколько целесообразно первично обосновывать национальные КДУ, которые рассматривают с двух позиций: как ориентир качества выполненной процедуры и как средство оптимизации уровня облучения пациента. С первой точки зрения, учитывая разнообразие используемого в нашей стране рентгенодиагностического оборудования в настоящее время и отсутствие стандартизованных методик, национальный уровень может отражать пример наилучшей рентгенологической практики. В то же время стандартизированный по типу оборудования, режимам выполнения исследований, по возрастностo-анатомическим особенностям пациентов КДУ можно включить в описание методики проведения процедуры. Для этого требуется представить информацию о диапазонах ПДП, полученных с учетом вышеуказанных условий на оборудовании различных типов, функционирующих в оптимальном техническом состоянии, что можно осуществить только на местном уровне. Для обеспечения контроля оптимального технического состояния оборудования требуется определить необходимый и достаточный объём контролируемых показателей для аналогового и цифрового рентгенодиагностического

оборудования, что потребует актуализации раздела «Перечень эксплуатационных параметров медицинского рентгеновского оборудования, подлежащих контролю» (Приложения 10) в новой редакции СанПиН 2.6.1.1192-03.

Следующий вопрос, который необходимо прояснить, – какие дополнительные условия проведения процедуры должны быть учтены при обосновании КДУ.

По нашему мнению, при установлении КДУ на местном уровне (на уровне медицинской организации) целесообразно учитывать тип аппарата, характеристики выполнения процедуры (проекция, размер поля, режимы выполнения процедуры), характеристики пациента (пол, возраст, вес и тип телосложения пациента), которые оказывают влияние на величину полученной дозы (ПДП).

Таким образом, принципиальным является вопрос об определении цели обоснования КДУ на местном, региональном или национальном уровнях.

На национальном уровне должны быть разработаны «уровни наилучшей практики» с учетом типа оборудования, возрастной группы пациентов и типа телосложения.

На региональном уровне санитарная служба должна регулярно проводить анализ полученных пациентами доз с сопоставления регионального КДУ с национальным уровнем «наилучшей практики». В качестве иллюстрации необходимости дифференцировать уровни КДУ приводятся сведения о средних эффективных дозах по видам процедур, полученных на основании измерений в медицинских организациях (МО) Ростовской области различной принадлежности (бюджетные, ведомственные, коммерческие) (табл. 1–3) [18], на различном оборудовании, как по типу, так и техническому оснащению. Кроме того, группы пациентов не стандартизированы по массе тела, возрасту, полу. В результате существенная разница 2 более раза отмечена по всем областям исследования. Делать конструктивные выводы о причинах этих расхождений можно, только если будут обоснованы каждой МО свои местные КДУ.

Запретительные интонации – это прерогатива надзорных органов, а в данном случае требуется сотрудничество контролирующих органов и администрации МО, организаций, занимающихся техническим обслуживанием медицинского рентгеновского оборудования, для совместной деятельности по ограничению (оптимизации) медицинского облучения населения [5]. Для перехода от «преимущественно запретительных интонаций» к смещению акцентов в сторону внедрения современных принципов обоснования и оптимизации радиационной защиты пациентов в Ростовской области в 2019 г. разработана региональная Программа «Обеспечение радиационной безопасности при медицинском рентгенодиагностическом облучении населения Ростовской области на период 2020–2022 годы и на перспективу до 2024 года». В Программе предусмотрены в том числе мероприятия по оптимизации контроля и учёта доз облучения пациентов, установлению местных и региональных КДУ облучения пациентов и порядка их пересмотра.

На основе анализа вышеприведенных международных и отечественных документов можно выделить принципы для установления КДУ:

– выбранное значение КДУ можно получить на практике;

Таблица 1
Средние эффективные дозы пациентов при флюорографии органов грудной клетки, полученные на основании измерений
[Table 1]

Average effective patient doses for the fluorography of the chest calculated based on measurements

Область исследования [Anatomic area]	Средние эффективные дозы облучения пациентов, мЗв/процедуру [Average effective patient doses, mSv/procedure]					
	Пленочные [analogue]			Цифровые [digital]		
	1*	2*	3*	1*	2*	3*
Органы грудной клетки [Chest]	0,282	0,357	0,243	0,041	0,110	0,028
в том числе за счет профилактиче- ских процедур [Including, tuberculosis screening]	0,282	0,357	0,243	0,042	0,110	0,021

1* – бюджетные МО [budgetary medical organizations]; 2* – ведомственные МО [departmental medical organizations];
3* – коммерческие МО [commercial medical organizations].

Таблица 2
Средние эффективные дозы пациентов при рентгенографии различных областей исследования,
полученные на основании измерений

Average effective patient dose for the radiography of different anatomic areas based on measurements

Область исследования [Anatomic area]	Средние эффективные дозы пациентов при рентгенографии, мЗв/процедуру [The average effective dose of patients by x- rays, mSv/procedure]					
	Пленочные [analogue]			Цифровые [digital]		
	1*	2*	3*	1*	2*	3*
Органы грудной клетки [Chest]	0,102	0,078	0,140	0,027	0,053	0,030
в том числе за счет профилактических процедур [Including tuberculosis screening]	0,135	0,075	0,078	0,030		0,030
Конечности [Extremities]	0,010	0,017	0,007	0,009	0,027	0,010
Позвонки [Spine]: шейные [cervical]	0,123	0,121	0,085	0,027	0,058	0,026
грудные [thoracical]	0,329	0,506	0,149	0,058	0,173	0,045
поясничные [lumbar]	0,598	1,245	0,256	0,087	0,067	0,080
Таз и бедро [Pelvis and hip]	0,583	1,171	0,101	0,109	0,264	0,100
Рёбра и грудина [Ribs and sternum]	0,425	0,678	0,782	0,079	0,221	0,100
Органы брюшной полости [Abdomen]	0,669	0,265		0,332		0,200
Череп, челюстно-лицевая область [Skull]		0,069	0,082		0,113	0,019
Зубы [teeth]	0,006	0,021	0,022	0,003	0,003	0,002
Почки, мочевыводящая система [Kidneys, urinary system]	0,492	0,805		0,146		0,100

Область исследования [Anatomic area]	Средние эффективные дозы пациентов при рентгенографии, мЗв/процедуру [The average effective dose of patients by x- rays, mSv/procedure]					
	Пленочные [analogue]			Цифровые [digital]		
	1*	2*	3*	1*	2*	3*
Молочная железа [mammary gland]	0,062	0,205		0,057	0,080	
в том числе за счет профилактических процедур Including breast cancer screening]	0,052	0,162		0,063		

1* – бюджетные МО [budgetary medical organizations]; 2* – ведомственные МО [departmental medical organizations];
3* – коммерческие МО [commercial medical organizations].

Таблица 3

Средние эффективные дозы пациентов при компьютерной томографии различных областей исследования

[Table 3]

Average effective patient doses for computed tomography in examinations]

Область исследования [Anatomic area]	Средние эффективные дозы пациентов при компьютерной томографии, мЗв/процедуру [Average effective doses of patients with computed tomography, mSv / procedure]		
	1*	2*	3*
Органы грудной клетки [Chest]	3,861	3,077	2,549
Конечности [Extremities]	0,121	0,204	0,160
Позвонки [Spine]: шейные [cervical]	2,744	2,392	2,215
грудные [thoracical]	2,973	3,490	4,944
поясничные [lumbar]	4,245	4,013	5,803
Таз и бедро [Pelvis and hip]	5,200	4,140	2,455
Рёбра и грудина [Ribs and sternum]	3,000		
Органы брюшной полости [Abdomen]	6,527	5,726	9,754
Череп, челюстно-лицевая область [Skull]		1,243	0,456
Зубы [teeth]	0,068		0,068
Почки, мочевыводящая система [Kidneys, urinary system]	6,587	6,009	10,00

1* – бюджетные МО [budgetary medical organizations]; 2* – ведомственные МО [departmental medical organizations];
3* – коммерческие МО [commercial medical organizations].

– КДУ должен представлять измеренную величину и быть основан на соответствующих местных, региональных и национальных данных;
– КДУ, полученный на местном уровне, сравнивается с региональным и национальным с целью достижения условий наилучшей рентгенодиагностической практики;
– КДУ является основой для расчёта эффективной дозы облучения пациентов, с целью последующей оценки относительного изменения риска при данной задаче медицинской визуализации.

Литература

1. МКРЗ. Публикация № 60. Рекомендации международной комиссии по радиологической защите 1990 года. М.: Энергоатомиздат, 1994. 192 с.
2. ICRP, 1996. Radiological protection and safety in medicine. ICRP Publication 73. Ann. ICRP 26(2).
3. Публикация 103 МКРЗ. Рекомендации Международной Комиссии по Радиационной защите от 2007 г. Пер. с англ.; под общ. ред. М.Ф. Киселева, Н.К. Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. 312 с.

4. ICRP, 2001. Radiation and your patient: a guide for medical practitioners. Also includes: Diagnostic reference levels in medical imaging – review and additional advice. ICRP Supporting Guidance 2. Ann. ICRP 31(4).
5. European Commission. Council Directive 97/43/EURATOM of 30 June 1997 on Health Protection of Individuals against the Danger of Ionizing Radiation in Relation to Medical Exposure. Official Journal of the European Commission, 180.
6. Публикация 105 МКРЗ. Радиационная защита в медицине. Пер. с англ.; под ред. М.И. Балонова. СПб.: ФГУН НИИРГ, 2011. 66 с.
7. Вишнякова Н.М. Оптимизация радиационной защиты пациентов при медицинском диагностическом облучении: автореф. дисс. докт. мед. наук. СПб, 2010. 44 с.
8. Пономарева Т.В., Кальницкий С.А., Вишнякова Н.М. Медицинское облучение и профилактика отдаленных последствий // Радиационная гигиена. 2008. Т. 1, № 1. С. 63–69.
9. Вишнякова Н.М. Частота и уровни облучения пациентов и населения России за счет лучевой диагностики с применением источников ионизирующих излучений // Радиационная гигиена. 2010. Т. 3, № 3. С. 17–22.
10. Мавренков Э.М. Радиационно-гигиеническая характеристика доз облучения медицинского персонала и пациентов при интервенционных методах диагностики и лечения в лечебно-профилактических учреждениях Министерства обороны Российской Федерации: автореф. дисс. канд. мед. наук. СПб, 2010. 19 с.
11. Нурлыбаев К., Мартынюк Ю.Н. Радиационная защита пациентов при рентгенодиагностике – дальнейшие шаги // АНРИ. 2010. № 3. С. 53–58.
12. Воронин К.В., Охрименко С.Е., Никитина М.Н. Измерение произведения дозы на площадь как метод контроля параметров рентгеновского аппарата и оптимизации доз облучения пациентов // АНРИ. 2000. № 4. С. 65–69.
13. Bor D., Sancak T., Olgar T., et al. Comparison of effective dose obtained from dose-area product and air kerma measurements in interventional radiology // Br. J. Radiol. 2004. V. 77. P. 315–322.
14. Archer B.R., Wagner L.K. Protecting patients by training physicians in fluoroscopic radiation management // J Appl Clin Med Phys. 2000. Vol. 1. P. 32–37.
15. Водоватов А.В., Кальницкий С.А., Балонов М.И., и др. К разработке референтных диагностических уровней облучения пациентов в отечественной рентгеновской диагностике // Радиационная гигиена. 2013. Т. 6, № 3. С. 29–37.
16. Водоватов А.В. Практическая реализация референтных диагностических уровней для оптимизации защиты пациентов при проведении стандартных рентгенологических исследований // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 1. С. 47–55.
17. Водоватов А.В., Голиков В.Ю., Кальницкий С.А., и др. Анализ уровней облучения взрослых пациентов при проведении наиболее распространенных рентгенографических исследований в Российской Федерации в 2009–2014 гг. // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 3. С. 66–75.
18. Информационный бюллетень «Характеристика показателей радиационной безопасности объектов окружающей среды, доз облучения граждан Ростовской области по результатам радиационно-гигиенической паспортизации на административных территориях области по итогам 2017г.». Управление Роспотребнадзора по Ростовской области, Ростов-на-Дону. 2018. С. 71.

Поступила: 20.05.2019 г.

Калинина Марина Владимировна – кандидат медицинских наук, начальник отдела надзора за радиационной безопасностью Управления Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Ростовской области. Адрес для переписки: 344019, Россия, Ростов-на-Дону, 18-я линия, д. 17; E-mail: kalinina@rpnrdon.ru

Жукова Татьяна Васильевна – доктор медицинских наук, профессор, заведующая кафедрой гигиены Ростовского государственного медицинского университета Министерства здравоохранения Российской Федерации, Ростов-на-Дону, Россия

Для цитирования: Калинина М.В., Жукова Т.В. Методические аспекты обоснования контрольных диагностических уровней облучения пациентов при медицинских рентгенодиагностических исследованиях // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 123–130. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-123-130

Methodological aspects of the justification of control diagnostic levels of patient exposure in medical X-ray examinations

Marina V. Kalinina¹, Tatyana V. Zhukova²

¹ Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being in the Rostov Region, Rostov-on-Don, Russia

² Rostov State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation, Rostov-on-Don, Russia

Optimization of medical exposure by substantiating the reference level of patients during diagnostic medical procedures in domestic health care requires harmonization with international recommendations. The paper sets out the history of the question of developing a reference level based on materials from international

Marina V. Kalinina

Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being in the Rostov Region

Address for correspondence: 18th line, 17, Rostov-on-Don, 344019, Russia; E-mail: kalinina@rpnrdon.ru

and domestic regulatory documents, draws attention to the formation of a glossary, presents possible ways of collecting information about the measured levels of patient exposure during x-ray studies obtained at the local, regional and national levels.

Key words: reference diagnostic level, control diagnostic level, indicative level of medical exposure, optimization of medical exposure, radiological practice.

References

1. ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60 (Users Edition). (In Russian)
2. ICRP, 1996. Radiological protection and safety in medicine. ICRP Publication 73. Ann. ICRP 26(2).
3. ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: translation from English. Edited by M.F. Kiselev, N.K. Shandala. Moscow: «Alana»; 2009. 312 p. (In Russian)
4. ICRP, 2001. Radiation and your patient: a guide for medical practitioners. Also includes: Diagnostic reference levels in medical imaging – review and additional advice. ICRP Supporting Guidance 2. Ann. ICRP 31(4).
5. European Commission. Council Directive 97/43/EURATOM of 30 June 1997 on Health Protection of Individuals against the Danger of Ionizing Radiation in Relation to Medical Exposure. Official Journal of the European Commission, 180.
6. ICRP Publication 105. Radiation Protection in medicine. Russian translation under M.I. Balonov. St. Petersburg; 2011. 66 p. (In Russian).
7. Vishnyakova NM. Optimization of radiation protection of patients during medical diagnostic radiation: author. Diss... Ph.D. St. Petersburg; 2010. 44 p. (In Russian).
8. Ponomareva TV, Kalnitsky SA, Vishnyakova NM. Medical exposure and strategy of its prophylaxis. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2008;1(1): 63-68 (In Russian).
9. Vishnyakova NM. Exposure frequency and levels due to the examination methods using ionizing sources for the patients and population of Russia. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2010;3(3): 17-22 (In Russian).
10. Mavrenkov EM. Radiation and hygienic characteristics of radiation doses of medical personnel and patients with interventional methods of diagnosis and treatment in medical institutions of the Ministry of defense of the Russian Federation: autoref. Diss... Ph.D. Sciences. St. Petersburg; 2010. 19 p. (In Russian).
11. Nurlybaev KI, Martynyuk YuN. Methods of improving adequacy of data on medical exposure during x-ray diagnostics are discussed. *ANRI=ANRI*. 1010;3: 53-58. (In Russian).
12. Voronin KV, Okhrimenko SE, Nikitina MN. Measurement of the product of the dose per area as a method of monitoring the parameters of the X-ray apparatus and optimizing patient doses. *ANRI=ANRI*. 2000;4: 65-69. (In Russian).
13. Bor D, Sancak T, Olgar T, Elcim Y, Adanali A, Sanlidilek U, et al. Comparison of effective dose obtained from dose-area product and air kerma measurements in interventional radiology. *Br. J. Radiol*. 2004;77: 315-322.
14. Archer BR, Wagner LK. Protecting patients by training physicians in fluoroscopic radiation management. *J Appl Clin Med Phys*. 2000; 1:32-37.
15. Vodovatov AV, Kalnitsky SA, Balonov MI, Kamyshanskaya IG. Development of diagnostic reference levels (DRL) of patients x-ray exposure in diagnostic radiology. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2013;6(3): 29-36 (In Russian).
16. Vodovatov AV. Practical implementation of the diagnostic reference levels concept for the common radiographic examinations. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(1): 47-55 (In Russian).
17. Vodovatov AV, Golikov VYu, Kalnitsky SA, Shatsky IG, Chipiga LA. Evaluation of levels of exposure of adult patients from common radiographic examinations in the Russian Federation in 2009–2014. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(3): 66-75 (In Russian).
18. Information Bulletin «Characteristics of radiation safety indicators of environmental objects, radiation doses of citizens of the Rostov region based on the results of radiation and hygiene certification in the administrative territories of the region in 2017». Department of Rospotrebnadzor for the Rostov region, Rostov-on-don. 2018. 71 p. (In Russian).

Received: May 20, 2019

For correspondence: Marina V. Kalinina – Candidate of Medical Sciences, Head of Radiation Safety Oversight Department, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being in the Rostov Region (18th line, 17, Rostov-on-Don, 344019, Russia; E-mail: kalinina@rpdndon.ru)

Tatyana V. Zhukova – Doctor of Medical Science, Professor, Head of the Department of Hygiene, Rostov State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation, Rostov-on-Don, Russia

For citation: Kalinina M.V., Zhukova T.V. Methodological aspects of the justification of control diagnostic levels of patient exposure in medical X-ray examinations. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No 3. P. 123-130. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-123-130

Обзор радиационных инцидентов на территории Воронежской области

Ю.И. Стёпкин^{1,2}, М.И. Чубирко^{1,2}, М.К. Кузмичев^{1,2}, О.В. Клепиков^{1,3}, С.А. Епринцев⁴

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

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

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

⁴Воронежский государственный университет Министерства образования и науки России, Воронеж, Россия

Целью работы являлась характеристика радиационных инцидентов, имевших место на территории Воронежской области. Материалы и методы. Для подготовки статьи использованы фоновые данные радиологической лаборатории Центра гигиены и эпидемиологии в Воронежской области за 2009–2018 гг. Все измерения при расследовании радиационных инцидентов проводились дозиметром-радиометром МКС-АТ1117М, прошедшим государственную поверку. Определялась мощность эквивалентной дозы гамма-излучения (мкЗв/ч). Результаты. На территории Воронежской области за 10 последних лет зарегистрировано 8 радиационных инцидентов, которые связаны: с бытовыми часами – 4 (измерения по заявлению граждан), обнаружением бесхозных источников ионизирующих излучений – 2, металлоломом – 1 и термометром – 1 (при таможенном досмотре). По классификации ЧС все радиационные инциденты носят локальный характер, т.е. не выходят за пределы территории объекта, по международной шкале ядерных и радиологических событий INES относятся к инциденту (аномалиям) с уровнем 1 «небольшие проблемы с безопасностью компонентов, радиоактивный источник низкого уровня активности». Все взаимодействия по расследованию радиоактивных инцидентов с участием специалистов радиологической лаборатории Центра гигиены и эпидемиологии в Воронежской области с другими службами показали хороший уровень оперативного реагирования.

Ключевые слова: источники ионизирующего излучения, радиационные инциденты, радиационная безопасность.

Введение

Оценке последствий радиационных аварий и инцидентов только по данным крупнейшего отечественного Российского информационного портала в области науки, технологии, медицины и образования – Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU по поисковому запросу на 18.04.2019 г. «радиационный инцидент» в названии публикации и ключевых словах за 2014–2019 г. найдено 87 статей.

По данным информационно-аналитического центра Роспотребнадзора, функционирующего на базе ФБУН «Санкт-Петербургский НИИ радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева», ежегодно в Российской Федерации регистрируется от 150 до 240 ситуаций, связанных с утерей контроля над источниками ионизирующего излучения (ИИИ), более 95% которых следует отнести к радиационным инцидентам, не приведшим к загрязнению окружающей среды и сверхнормативному облучению населения. При этом, согласно классифика-

ции радиационных аварий и инцидентов, наиболее распространенными из них являются нарушение правил сбора и оборота металлолома – 40,3%, нарушение правил транспортировки радиоактивных веществ 17,2%, обнаружение бесконтрольного (неучтенного) – ИИИ – 9,4% [1].

Среди других радиационных инцидентов отмечаются выявления пациентов после радионуклидных процедур, нарушения использования ИИИ в медицине, технологические нарушения эксплуатации ИИИ в ядерной промышленности [2, 3].

Следует также отметить, что нормативно-методическая база документов, определяющих порядок реагирования управлений Роспотребнадзора и подведомственных ему учреждений при угрозе возникновения и возникновении чрезвычайных ситуаций, связанных с радиационными авариями и инцидентами, достаточно обширна, но, по мнению ряда авторов, требует своего совершенствования в части координации действий и обмена получаемой информацией между учреждениями Роспотребнадзора,

Стёпкин Юрий Иванович

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: san@sanep.vrn.ru

МЧС России, ФМБА России, Росгидромета [4]. Такая работа уже начата ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамазаева с ФГБОУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна в рамках разработки Концепции «Организация проведения радиационно-гигиенических мероприятий в случае ЧС радиационного характера и координации действий сил и средств организаций и учреждений ФМБА России и Роспотребнадзора» [4, 5].

Цель исследования – характеристика радиационных инцидентов, имевших место на территории Воронежской области.

Материалы и методы

Для подготовки статьи использованы фондовые данные радиологической лаборатории ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Воронежской области» за 2009–2018 гг.

Все измерения при расследовании радиационных инцидентов проводились дозиметром-радиометром МКС-АТ1117М, прошедшим государственную поверку. Определялась мощность эквивалентной дозы (МЭД) гамма-излучения (мкЗв/ч).

Результаты исследования

Всего на территории Воронежской области за последние 10 лет зарегистрировано 8 радиационных инцидентов.

В 2009 г. на территории гаражно-строительного кооператива «Тельмановец» в Воронеже были обнаружены ящики с радиоизотопными приборами (радиоизотопные извещатели дыма «РИД-6М»). Сигнал поступил в МЧС от владельцев гаражей, увидевших знаки радиационной опасности на заводских упаковках. Результаты измерений МЭД гамма-излучения, выполненных специалистами радиологической лаборатории Центра гигиены и эпидемиологии в Воронежской области, показали отсутствие превышений фоновых значений (0,13 мкЗв/ч). Радиоактивного загрязнения места обнаружения ИИИ не выявлено.

Облучения людей сверх установленных пределов и радиоактивного загрязнения территории не зарегистрировано.

В 2015 г. на территории демонтированного цеха бывшего завода ОАО «Воронежский экскаваторный завод им. Коминтерна» (г. Воронеж, Московский проспект, д. 11) при проведении строительных работ в заброшенном колодце был обнаружен бесхозный источник ионизирующего излучения (закрытый радионуклидный источник). Знака радиационной опасности на нем не было, но руководитель строительных работ, по счастливой случайности, знал, как выглядят защитные контейнеры переносных ИИИ, и вызвал к месту обнаружения представителей МЧС.

Впоследствии выяснено, что это был ИИИ в защитном контейнере от переносного радионуклидного дефектоскопа. Специалистами радиологической лаборатории Центра гигиены и эпидемиологии в Воронежской области, которым было передано сообщение из МЧС, были организованы измерения МЭД гамма-излучения на различных расстояниях от колодца и на поверхности контейнера после его извлечения из колодца (табл.).

Таблица
МЭД гамма-излучения на месте обнаружения бесхозного ИИИ

[Table]

Gamma-radiation equivalent dose rate on the site of the location of the orphan source]

Место измерения [Site of measurement]	МЭД гамма-излучения, мкЗв/ч [Gamma-radiation equivalent dose rate, μ Sv/h]
0,1 м от колодца [0,1 m from the well]	0,16
1 м от колодца [1m from the well]	0,15
На поверхности контейнера [on the container surface]	4,10
0,1 м от контейнера [0,1 m from the container]	1,70
1,0 м от контейнера [1 m from the container]	0,23
1,5 м от контейнера [1.5 m from the container]	0,15
2,0 м от контейнера [2 m from the container]	0,13

Максимальное значение МЭД гамма-излучения, составляющее 4,1 мкЗв/ч, выявлено на поверхности контейнера. На расстоянии в 2 м от него МЭД гамма-излучения имело фоновое значение – 0,13 мкЗв/ч. В соответствии с п.3.7 СП 2.6.1.3241-14 «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при радионуклидной дефектоскопии», мощность амбиентного эквивалента дозы излучения на расстоянии 1 м от поверхности защитного блока переносного радионуклидного дефектоскопа с источником при нахождении источника в положении хранения не должна превышать 20 мкЗв/ч. Таким образом, МЭД гамма-излучения от радиоактивного источника, находящегося в защитном контейнере, не превышала допустимых значений. Идентификация используемого в ИИИ изотопа не проводилась в связи с отсутствием необходимого оборудования. По результатам расследования инцидента установлено, что ИИИ принадлежал Воронежскому экскаваторному заводу им. Коминтерна, который был ликвидирован как юридическое лицо в 2009 г. Контейнер был вывезен на специально оборудованном автомобиле аварийно-спасательной службы Казенного учреждения Воронежской области «Гражданская оборона, защита населения и пожарная безопасность Воронежской области» на временное хранение в специально оборудованные складские помещения. Пострадавших в связи с произошедшей чрезвычайной ситуацией не зарегистрировано. В ликвидации чрезвычайной ситуации участвовали представители Главного управления МЧС России по Воронежской области, ГО ЧС г. Воронежа, аварийно-спасательной службы Воронежской области Казенного учреждения Воронежской области «Гражданская оборона, защита населения и пожарная безопасность Воронежской области», Управления ФСБ по Воронежской области и Главного управления МВД России по Воронежской области, ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Воронежской области». О чрезвычайной ситуации,

связанной с радиационным инцидентом, своевременно проинформирована Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.

В 2018 г. зарегистрировано 6 случаев обнаружения локальных источников ионизирующего излучения.

В первом случае источник выявлен в партии металлолома (2 фрагмента металлической трубы) при таможенном досмотре грузового автомобиля с полуприцепом из Латвии, перевозившего партию лома легированной стали (коррозионностойкой) общей массой 21,0 т. Для уточнения радиационной обстановки специалистами Центра гигиены и эпидемиологии в Воронежской области проведен радиационный контроль обнаруженной партии металлолома, подготовленной для реализации в соответствии с положениями МУК 2.6.1.1087-02 «Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Радиационный контроль металлолома». Уровень гамма-излучения от загруженного металлоломом автомобиля на расстоянии 0,1 м вдоль кузова полуприцепа составил от 0,63 до 6,5 мкЗв/ч. Мощность дозы между правым колесом средней оси полуприцепа и кузова на расстоянии 0,1 м от дна составляла 7,5 мкЗв/ч (норматив 0,20 мкЗв/ч в соответствии с п. 3.4 СанПиН 2.6.1.993-00 «Гигиенические требования к обеспечению радиационной безопасности при заготовке и реализации металлолома» с изменениями на 14.07.2009 г.). При последующей разгрузке автомобиля были обнаружены две металлические трубы с повышенным фоном (работы проводились сотрудниками Росэнергоатома), которые были переданы в филиал концерна «Росэнергоатом» Нововоронежской АЭС для дальнейшего захоронения.

Во втором случае при прохождении таможенного контроля на территории международного аэропорта «Воронеж-Чертовицкое» (г. Воронеж) был задержан прибывший из республики Узбекистан гражданин. В багаже гражданина обнаружен термометр авиационный самолетный ТВ-45 со светящимися шкалами и стрелками. Мощность дозы на расстоянии 0,1 м от термометра составляла 1,8–2,1 мкЗв/ч (норматив 1,0 мкЗв/ч), непосредственно на источнике – до 10 мкЗв/ч. Термометр был изъят и передан в филиал концерна «Росэнергоатом» Нововоронежской АЭС для дальнейшего захоронения.

В остальных четырех случаях в 2018 г. источником ионизирующего излучения являлись бытовые часы. Уровень гамма-излучения на расстоянии 0,1 м от них составил от 0,48 до 7,3 мкЗв/ч. Настенные и настольные часы со светящимися стрелками и шкалами были обследованы в разное время по заявлениям граждан о проведении измерения гамма-излучения. Все источники ионизирующего излучения после измерений помещались в специальные контейнеры и были вывезены для временного хранения в хранилище филиала АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежской АЭС в целях дальнейшей утилизации.

Пострадавших в связи с произошедшими радиационными инцидентами не зарегистрировано.

Важной составляющей аварийного реагирования является своевременное и объективное информирование населения о радиационных инцидентах. Обо всех рассмотренных случаях в региональные средства массовой информации (новостные интернет-порталы, телевидение, радио,

пресса), а также на сайты Управления Роспотребнадзора по Воронежской области и ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Воронежской области» была предоставлена информация о результатах измерений мощности эквивалентной дозы в сравнении с нормативом и о мероприятиях по обеспечению радиационной безопасности.

Заключение

Таким образом, на территории Воронежской области за 10 последних лет зарегистрировано 8 радиационных инцидентов, которые связаны: с бытовыми часами – 4 (по заявлению), обнаружением бесхозных ИИИ – 2, металлоломом – 1 и термометром – 1 (при таможенном досмотре). Все инциденты имели место на территории городского округа город Воронеж.

По классификации ЧС [3] все радиационные инциденты носят локальный характер, т.е. не выходят за пределы территории объекта. По международной шкале ядерных и радиологических событий INES [6] относятся к инциденту (аномалии) с уровнем 1 «Небольшие проблемы с безопасностью компонентов, радиоактивный источник низкого уровня активности».

Все взаимодействия по расследованию радиоактивных инцидентов с участием специалистов радиологической лаборатории Центра гигиены и эпидемиологии в Воронежской области с другими службами показали хороший уровень оперативного реагирования.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

Финансирование: публикация подготовлена в рамках проекта РФФИ №19-05-00660 «Разработка модели оптимизации социально-экологических условий для населения крупных городов».

Литература

1. Романович И.К., Ахматдинов Р.Р., Ахматдинов Р.Р., и др. Анализ радиационных аварий и инцидентов, зарегистрированных в Российской Федерации за 2012-2016 годы // Актуальные вопросы организации контроля и надзора за физическими факторами. М., 2017. С. 343-346.
2. Рыжов С.А. Реагирование на радиационные аварии и инциденты в медицине // Медицинская физика. 2018. № 1 (77). С. 37-38.
3. Галушкин Б.А. Анализ существующих классификаций возможных радиационных аварий и инцидентов на радиационно опасных объектах // Образование и наука в России и за рубежом. 2018. № 13 (48). С. 491-507.
4. Романович И.К., Барковский А.Н., Степанов В.С. Обеспечение санитарно-эпидемиологического благополучия населения Российской Федерации при возникновении радиационных аварий и инцидентов // Актуальные вопросы организации контроля и надзора за физическими факторами. М., 2017. С. 347-350.
5. Алдошин А.И., Аладова Е.Е., Василенко Е.К., и др. Современное состояние дел в области исследований и мероприятий для развития и организации реагирования на радиационные аварии и инциденты в системе ФМБА России // Вопросы радиационной безопасности. 2018. № 3 (91). С. 39-49.
6. Международная шкала ядерных событий (ИНЭС). Руководство для пользователей // IAEA-INES-2011. Вена: МАГАТЭ, 2010. 238 с.

Поступила: 22.04.2019 г.

Стёпкин Юрий Иванович – доктор медицинских наук, профессор, главный врач Центра гигиены и эпидемиологии в Воронежской области, заведующий кафедрой гигиенических дисциплин Воронежского государственного медицинского университета им. Н.Н. Бурденко. **Адрес для переписки:** 394038, г. Воронеж, ул. Космонавтов, д. 21; E-Mail: san@sanep.vrn.ru

Чубирко Михаил Иванович – заместитель главного врача Центра гигиены и эпидемиологии в Воронежской области, профессор кафедры общественного здоровья, здравоохранения, гигиены и эпидемиологии Воронежского государственного медицинского университета им. Н.Н. Бурденко, Воронеж, Россия

Кузмичев Максим Константинович – кандидат медицинских наук, заведующий радиологической лабораторией Испытательного лабораторного центра Центра гигиены и эпидемиологии в Воронежской области, доцент кафедры гигиенических дисциплин Воронежского государственного медицинского университета им. Н.Н. Бурденко, Воронеж, Россия

Клепиков Олег Владимирович – доктор биологических наук, профессор, заведующий отделением информационных технологий организационно-методического отдела Центра гигиены и эпидемиологии в Воронежской области, профессор кафедры промышленной экологии, оборудования химических и нефтехимических производств Воронежского государственного университета инженерных технологий, Воронеж, Россия

Епринцев Сергей Александрович – кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры геоэкологии и мониторинга окружающей среды Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия

Для цитирования: Стёпкин Ю.И., Чубирко М.И., Кузмичев М.К., Клепиков О.В., Епринцев С.А. Обзор радиационных инцидентов на территории Воронежской области // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 131–135. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-131-135

Review of radiation incidents in the territory of the Voronezh region

Yuriy I. Stepkin ^{1,2}, Mikhail I. Chubirko ^{1,2}, Maksim K. Kuzmichev ^{1,2}, Oleg V. Klepikov ^{1,3}, Sergey A. Eprintsev ⁴

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 work was to characterize the radiation incidents that took place in the territory of the Voronezh region. Materials and methods. To prepare this article the stock data of the radiological laboratory of the Center for Hygiene and Epidemiology in the Voronezh Region for 2009–2018 was used. All measurements in the investigation of radiation incidents were carried out with the MKS-AT1117M dosimeter-radiometer which passed the state calibration. The equivalent dose rate of gamma radiation ($\mu\text{Sv/h}$) was determined. Results. For the last 10 years, 8 radiation incidents were registered on the territory of the Voronezh region, which were related to domestic clocks – 4 (measurements according to citizens), the detection of orphan sources of ionizing findings – 2, scrap metal – 1 and a thermometer – 1 (during customs inspection). According to the classification of emergencies, the radiation incidents are local, i.e. do not go beyond the territory of the facility, according to the international scale of nuclear and radiological events, INES refer to the incident (anomalies) with the level 1 “minor problems with the safety of components, a radioactive source of low activity level”. All interactions in the investigation of radioactive incidents involving specialists from the radiological laboratory of the Center for Hygiene and Epidemiology in the Voronezh region with other services showed a good level of rapid response.

Key words: sources of ionizing radiation, radiation incidents, radiation safety.

References

1. Romanovich IK, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, Biblin AM, Gromov AV, Repin LV. Analysis of the radiation accidents and incidents, registered in the Russian Federation on 2012–2016. Actual issues of the management of the control and surveillance on the physical factors. Moscow; 2017: 343–346. (In Russian)
2. Ryzhov SA. Response to the radiation accidents and incidents in medicine. *Meditsinskaya fizika = Medical physics*. 2018;1(77): 37–38. (In Russian)

Yuriy I. Stepkin

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: san@sanep.vrn.ru

3. Galushkin BA. Analysis of the existing classifications of the possible radiation accidents and incidents on the radiation-hazardous facilities. *Obrazovanie i nauka v Rossii i za rubezhom = Education and science in Russia and abroad*. 2018;13(48): 491-507. (In Russian)
4. Romanovich IK, Barkovsky AN, Stepanov VS. Provision of the sanitary-epidemiological well-being of the public of the Russian Federation upon incurrence of the radiation accidents and incidents. *Aktualnye voprosy organizatsii kontrolya i nadzora za fizicheskimi faktorami = Actual issues of the management of the control and surveillance on the physical factors*. Moscow;2017: 347-350. (In Russian)
5. Aldoshin AI, Aladova EE, Vasilenko EK, Finashov LV, Maarov VA. Current state in the research and activities for the development and management of the response on the radiation accidents and incidents in the FMBA system. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Issues of the radiation safety*. 2018;3(91): 39-49. (In Russian)
6. INES: The International Nuclear and Radiological Event Scale User's Manual. IAEA-INES-2011. Vienne, IAEA; 2010: 238. (In Russian)

Received: April 22, 2019

For correspondence: Yuriy I. Stepkin – Doctor of medical sciences, professor, Chief medical officer of the «Center of hygiene and epidemiology in the Voronezh region», head of the department of hygienic sciences of «Voronezh state medical university after N.N. Burdenko» (Kosmonavtov str., 21, Voronezh, 394038, Russia; E-mail: san@sanep.vrn.ru)

Mikhail I. Chubirko – Deputy chief medical officer of the «Center of hygiene and epidemiology in the Voronezh region», professor of the department of social health, healthcare, hygiene and epidemiology of «Voronezh state medical university after N.N. Burdenko», Voronezh, Russia

Maksim K. Kuzmichev – MD, Head of radiological laboratory of the Test laboratory center of «Center of hygiene and epidemiology in the Voronezh region», docent of the department of hygienic sciences of the «Voronezh state medical university after N.N. Burdenko», Voronezh, Russia

Oleg V. Klepikov – Doctor of biological sciences, professor, head of the division of information technologies of the organization-methodical department of «Center of hygiene and epidemiology in the Voronezh region», professor of the department of industrial ecology, equipment of the chemical and oil and gas processing of the «Voronezh state university of the engineering technologies», Voronezh, Russia

Sergey A. Eprintsev – Candidate of geographic sciences, docent of the department of the geoecology and environmental monitoring of the «Voronezh state university», Voronezh, Russia

For citation: Stepkin Yu.I., Chubirko M.I., Kuzmichev M.K., Klepikov O.V., Eprintsev S.A. Review of radiation incidents in the territory of the Voronezh region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No. 3. P. 131–135. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426x-2020-13-3-131-135

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. Ценер. 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. Подписи должны быть размещены в основном тексте. Перед каждым рисунком, диаграммой или таблицей в тексте обязательно должна быть ссылка. В подписях к микрофотографиям, электронным микрофотографиям обязательно следует указывать метод окраски и обозначать масштабный отрезок. Диаграммы должны быть представлены в исходных файлах. Рисунки (диаграммы, графики) должны иметь подпись всех осей с указанием единиц измерения СИ. Легенда выносится за пределы рисунка.

20. Необходимо оформлять подписи к рисункам и таблицам, тексты внутри них на русском и на английском языках.

21. **Библиографические ссылки** в тексте должны даваться цифрами в квадратных скобках в соответствии со списком литературы в конце статьи.

Пример: В тексте: Общий список справочников по терминологии, охватывающий время не позднее середины XX века, даёт работа библиографа И.М. Кауфмана [59].

Если авторы не указаны, в отсылке указывают название документа, при необходимости указывают год издания, страницы.

Сведения в отсылке разделяют точкой и запятой.

Нумеруйте ссылки последовательно, в порядке их первого упоминания в тексте (не по алфавиту)! Для оригинальных научных статей – не менее 15–20 источников, для лекций и обзоров – не более 60 источников, для других статей – не более 15 источников.

22. К статье прилагаются на отдельном листе **два списка литературы.**

23. **В первом списке литературы (Литература)** библиографическое описание литературных источников должно соответствовать требованиям ГОСТ 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления».

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

24. **В списке литературы не следует указывать постановления, законы, санитарные нормы и правила, другие нормативно-методические документы.** Указания на них следует размещать в сносках или внутритекстовых ссылках. Сноски и внутритекстовые ссылки следует представить и на английском языке, написав после английского описания язык текста (In Russ.).

Примеры внутритекстовых ссылок:

.....согласно Норм радиационной безопасности (НРБ 99/2009): (СанПиН 2.6.1.2523 – 09) [перевод на английский язык (In Russ.)]. Илисогласно ГОСТ Р 5177212001. Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Входные и выходные параметры и типы соединений. Технические требования [перевод на английский язык (In Russ.)].

Подстрочные ссылки (сноски):

¹ СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» [Sanitary Regulations and Standards 2.2.4.3359-16 «Sanitary and epidemiological requirements for physical factors in the workplace» (In Russ.)]

¹ МУ 2.6.1.2944-11. Контроль эффективных доз облучения пациентов при медицинских рентгенологических исследованиях. М.: Роспотребнадзор, 2011. 40 с. [Methodical guidelines 2.6.1.2944-11 “Control of the patient effective doses from medical X-ray examinations”. Moscow, Rospotrebnadzor, 2011, 40 p. (In Russ.)]

ПРИМЕРЫ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИХ ССЫЛОК

Литература

Если имеется 3-4 автора, то указываются все. Если от 5 и больше – первые три автора, затем ставится «и др.».

Книги и брошюры:

Сергеев И.В., Смирнова Т.П., Исаков М.Н. Лучевая диагностика в России. СПб.: НИИРГ, 2007. 123 с.

Jenkins P.F. Making sense of the chest xray: a handson guide. New York: Oxford University Press; 2005. 194 p.

Iverson C., Flanagan A., Fontanarosa P.B. et al. American Medical Association manual of style. 9th ed. Baltimore (MD): Williams & Wilkins; 1998. 660 p.

Многотомные издания или на часть книги:

Пивинский Ю.Е. Общие вопросы технологии // Неформальные огнеупоры. М., 2003. Т. 1, кн. 1. С. 430-447.

Глава или раздел из книги:

Зайчик А.Ш., Чурилов Л.П. Основы общей патофизиологии // Основы общей патологии: учеб. пособие для студентов медвузов. СПб.: ЭЛБИ, 1999. Ч. 1., гл. 2. С. 124–169.

Riffenburgh R.H. Statistics in medicine. 2nd ed. Amsterdam (Netherlands): Elsevier Academic Press; 2006. Chapter 24, Regression and correlation methods; p. 447–86.

Ettinger S.J., Feldman E.C. Textbook of veterinary medicine: diseases of the dog and cat. 6th ed. St. Louis (MO): Elsevier Saunders; 2005. Section 7, Dietary considerations of systemic problems; p. 553–98.

Статьи из журнала, сборника:

Стамат И.П., Стамат Д.И. К обоснованию нормативов по содержанию природных радионуклидов в облицовочных изделиях и материалах // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, №1. С. 46-52.

Bailliff I.K., Slim H.A. Development of reference database for gamma dose assessment in retrospective luminescence dosimetry // Radiation Measurements. 2008. Vol. 43. P. 859–863.

Из сборника конференций (тезисы):

Кушинников С.И., Цапалов А.А. Проблемы достоверности оценки среднегодовой ЭРОА радона при радиационно-гигиеническом обследовании помещений. Сборник докладов и тезисов науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы обеспечения радиационной безопасности на территории Российской Федерации», Москва, 25-26 октября 2007. М., 2007. С. 50-51.

Ссылки на Интернет-ресурсы:

Официальный сайт Медицинского радиологического научно-учебного центра РАМН (МРНЦ РАМН). URL: <http://www.mrrc.obninsk/> (дата обращения: 19.02.2010).

Дубнер П.Н. Англо-русский статистический глоссарий: основные понятия/ URL: <http://masters.donntu.org/2002/fvti/spivak/library/book2/book2.htm> (дата обращения: 16.06.2019)

Ссылки на статьи с DOI:

Маткевич Е.И., Сеницын В.Е., Зеликман М.И. и др. Основные направления снижения дозы облучения пациентов при компьютерной томографии. REJR. 2018. Т.8, №3. С. 60-73. DOI:10.21569/2222-7415-2018-8-3-60-73.

Статьи, принятые к печати, но еще не вышедшие:

Горский Г.А., Еремин А.В., Стамат И.П. О необходимости радиационного обследования зданий после окончания строительства, капитального ремонта или реконструкции. Радиационная гигиена, 2010. Т. 3, № 1. Деп. 10.02.2010 г.

Патенты:

Карамуллин М.А., Шутко А.Н., Сосюкин А.Е. и др. Пат. № 2268031 Российская Федерация, МПК А61Н23.00. Способ коррекции отдаленных последствий радиационного воздействия в малых дозах. опубл. 20.01.2006, БИ № 02.

Из газеты:

Фомин Н.Ф., Иванович Ф.А., Веселов Е.И. Выдающийся ученый, педагог, воспитатель. // Воен. врач, 1996. № 8 (1332) С. 5.

Фомин Н.Ф., Иванович Ф.А., Веселов Е.И. Выдающийся ученый, педагог, воспитатель. // Воен. врач, 1996. № 8 (1332). 5 сент.

Диссертация и автореферат диссертации:

Фенухин В.И. Этнополитические конфликты в современной России: на примере Северо-Кавказского региона: дис... канд. полит. наук: защищена 22.01.02; утв. 15.07.02. М., 2002. 215 с.

Кадука М.В. Роль грибов в формировании дозы внутреннего облучения населения после аварии на Чернобыльской АЭС: автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Обнинск, 2001. 23 с.

25. Второй список литературы (References) полностью соответствует первому списку литературы. Оформляется в соответствии с Ванкуверским стилем (Vancouver Style). При этом в библиографических источниках на русском языке фамилии и инициалы авторов должны быть транслитерированы. Название работы переводится на английский язык.

Иностранные библиографические источники из первого списка полностью повторяются во втором списке. Более подробно правила представления литературных источников во втором списке представлены ниже.

Примеры:

Статья 1-6 авторов

Petitti DB, Crooks VC, Buckwalter JG, Chiu V. Blood pressure levels before dementia. *Arch Neurol*. 2005 Jan;62(1):112-6.

Статья 7 и более авторов (указываются первые 6 авторов, далее «, et al.»)

Hallal AH, Amortegui JD, Jeroukhimov IM, Casillas J, Schulman CI, Manning RJ, et al. Magnetic resonance cholangiopancreatography accurately detects common bile duct stones in resolving gallstone pancreatitis. *J Am Coll Surg*. 2005 Jun;200(6): 869-75.

Статья в электронном журнале

Errami M, Garner H. A tale of two citations. *Nature*. 2008;451(7177): 397–399. Available from: <http://www.nature.com/nature/journal/v451/n7177/full/451397a.html> [Accessed 20 January 2015].

Read B. Anti-cheating crusader vexes some professors. *Chronicle of Higher Education*. 2008;54(25). Available from: <http://global.factiva.com/> [Accessed 18 June 2015].

Статья в электронном журнале с DOI:

Kanneganti P, Harris JD, Brophy RH, Carey JL, Lattermann C, Flanagan DC. The effect of smoking on ligament and cartilage surgery in the knee: a systematic review. *Am J Sports Med* [Internet]. 2012 Dec;40(12): 2872-8. Available from: <http://ajs.sagepub.com/content/40/12/2872> DOI: 10.1177/0363546512458223 [Accessed 19 Feb 2013]

Книга (печатная)

Carlson BM. Human embryology and developmental biology. 4th ed. St. Louis: Mosby; 2009. 541 p.

Книга (электронная)

Shreeve DF. Reactive attachment disorder: a case-based approach [Internet]. New York: Springer; 2012. 85 p. Available from: <http://ezproxy.lib.monash.edu.au/login?url=http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4614-1647-00363546512458223> [Accessed 2 Nov 2012]

Отчет официальной организации (государственный, ведомственный, пр.).

Rowe IL, Carson NE. Medical manpower in Victoria. East Bentleigh (AU): Monash University, Department of Community Practice; 1981. 35 p. Report No.: 4.

Leatherwood S. Whales, dolphins, and porpoises of the western North Atlantic. U.S. Dept. of Commerce. Report number: 63, 2001.

Веб-страница

Diabetes Australia. Diabetes globally [Internet]. Canberra ACT: Diabetes Australia; Available from: <http://www.diabetesaustralia.com.au/en/Understanding-Diabetes/DiabetesGlobally/> [Accessed Nov 5 2012].

European Space Agency. Rosetta: rendezvous with a comet. Available from: <http://rosetta.esa.int> [Accessed 15 June 2015].

Из сборника конференций (тезисы)

Wittke M. Design, construction, supervision and long-term behaviour of tunnels in swelling rock. In: Van Cotthem A, Charlier R, Thimus J-F, Tshibangu J-P. (eds.) Eurock 2006: multiphysics coupling and long term behaviour in rock mechanics:

Proceedings of the International Symposium of the International Society for Rock Mechanics, EUROCK 2006, 9–12 May 2006, Liège, Belgium. London: Taylor & Francis; 2006. P. 211–216.

Стандарт

British Standards Institution. BS EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3. *Design of steel structures. General rules. Structural fire design*. London: BSI; 2005.

Методические рекомендации/руководство

National Institute for Health and Care Excellence (NICE), Tuberculosis: NICE Guideline [NG33]. 2016. Available from: <https://www.nice.org.uk/guidance/ng33/resources/tuberculosis-1837390683589> [Accessed 27 May 2017].

Ответственность за правильность изложения библиографических данных возлагается на автора.

Все статьи печатаются в журнале бесплатно.

Статьи направляются по адресу: 197101, г. СанктПетербург, ул. Мира, д. 8, Федеральное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева». Редакция журнала «Радиационная гигиена» и по email: journal@niirg.ru.

Справки по телефону: (812) 2334283 и (812) 2335016 (редакция журнала «Радиационная гигиена»).

Факс: (812) 2335363, 2334283.