

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

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

ТОМ 14 № 3, 2021



**Научно-практический
журнал**

УЧРЕДИТЕЛЬ:
Федеральное бюджетное
учреждение науки
«Санкт-Петербургский
научно-исследовательский
институт радиационной гигиены
имени профессора П.В. Рамзаева»
Федеральной службы по надзору
в сфере защиты прав потребителей
и благополучия человека

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

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

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

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

Издается ежеквартально.

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

Ссылка на журнал «РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА» обязательна.

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

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

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

Тираж 200 экз.

ISSN 1998-426X



9 771998 426783 >

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

© «Радиационная гигиена», 2021

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

RADIATIONNAYA GYGIENA

Председатель редакционного совета
Г.Г. Онищенко

Главный редактор
И.К. Романович



Том 14 № 3, 2021

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»
Federal Service for Surveillance
on Consumer Rights Protection
and Human Well-Being

Quarterly published

Editorial office address:

Mira str., 8, 197101,
St.-Petersburg, Russia
Phone: (812) 233-42-83, 233-50-16
Phone/Fax: (812) 233-42-83
E-mail: journal@niirg.ru
Web: www.radhyg.ru

RADIATION HYGIENE

Chairman of Editorial Council

Gennadiy G. Onishchenko

Editor-in-Chief

Ivan K. Romanovich



RADIATION HYGIENE

Vol. 14 № 3, 2021

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. Gorbaney — Northwest Public Health Research Center (Saint Petersburg, Russian Federation)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial Board

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

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

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

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

Mikhail I. Balonov — Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Doctor of Biology, Professor (Saint Petersburg, Russian Federation)

Tat'yana B. Baltrukova — Northwest State Medical University after I.I. Mechnikov (Saint Petersburg, Russian Federation)

Sergey M. Vakulovsky — Federal State Budgetary Institution Research and Production Association «Typhoon», Doctor of Engineering, Professor (Kaluga region, Russian Federation)

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

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

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

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

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

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

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

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 14 № 3, 2021

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

Репин В.С.

Модель расчета доз облучения клеток трахеобронхиального отдела при движении точечного источника бета-излучения.....6

Толстых Е.И., Дегтева М.О., Аклейев А.В.

Оценка доз облучения лимфоцитов при пероральном поступлении радионуклидов различной тропности.....18

Васильев А.С., Романович И.К., Кононенко Д.В., Кормановская Т.А., Сапрыкин К.А., Балабина Т.А.

Обоснование методических подходов к контролю содержания радона в воздухе помещений эксплуатируемых общественных зданий с некруглосуточным пребыванием людей.....29

Жуковский М.В., Ярмошенко И.В., Онищенко А.Д., Малиновский Г.П.
Прогностическая оценка риска рака легкого при сочетанном действии радона и курения с использованием аддитивно-мультипликативной модели риска41

Голиков В.Ю., Водоватов А.В., Чипига Л.А., Шацкий И.Г.

Оценка радиационного риска у пациентов при проведении медицинских исследований в Российской Федерации...56

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

Риск заболеваемости раком молочной железы у аварийно-облученных лиц Южного Урала69

Осипов М.В., Шкаредных В.Ю., Логинов В.С., Мельников В.В., Дружинина П.С., Сокольников М.Э.

Ретроспективный анализ онкологической заболеваемости пациентов после проведения компьютерной томографии.....80

Дружинина П.С., Поздняков А.В., Капырина Ю.Н., Иванов Д.О., Петренко Ю.В., Пузырев В.Г.

Сравнение методов расчета эффективных доз облучения детей при проведении КТ-исследований органов грудной клетки91

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

О необходимости проведения регулярного контроля доз облучения хрусталиков глаз у персонала, занятого на работах с использованием радиофармацевтических препаратов101

ЕСКИД И РАДИАЦИОННО-ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ПАСПОРТИЗАЦИЯ

Кормановская Т.А., Ахматдинов Р.Р., Горский Г.А.

Итоги 20 лет функционирования Федерального банка данных по дозам природного облучения населения Российской Федерации112

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Водоватов А.В., Чипига Л.А., Пивень П.А., Труфанов Г.Е., Беркович Г.В., Мащенко И.А., Дружинина П.С., Пузырев В.Г., Рыжов С.А.

Оценка поглощенных доз в плоде при проведении компьютерной томографии органов грудной клетки беременной женщины126

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА

«РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА136

CONTENTS

Vol. 14 № 3, 2021

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

Repin V.S.

A model for calculating beta exposure doses to tracheobronchial cells during movement of a point source.....16

Tolstykh E.I., Degteva M.O., Akleyev A.V.

Estimation of lymphocyte radiation doses after the ingestion of radionuclides of different tropicity.....26

Vasilyev A.S., Romanovich I.K., Kononenko D.V., Kormanovskaya T.A., Saprykin K.A., Balabina T.A.

Substantiation of methodical approaches to the control of indoor radon concentration in existing public buildings with non-round-the-clock stay of people.....39

Zhukovsky M.V., Yarmoshenko I.V., Onishchenko A.D., Malinovsky G.P.

Prognostic assessment of lung cancer risk under combined action of radon and smoking using an additive-multiplicative risk model53

Golikov V.Yu., Vodovатов A.V., Chipiga L.A., Shatsky I.G.

Evaluation of radiation risk for patients undergoing medical examinations in the Russian Federation67

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

Breast cancer incidence risk in accidentally exposed persons of the Southern Urals.....78

Osipov M.V., Shkarednykh V.Yu., Loginov V.S., Melnikov V.V., Druzhinina P.S., Sokolnikov M.E.

Retrospective analysis of cancer morbidity among patients after computed tomography88

Druzhinina P.S., Pozdnyakov A.V., Kapryina Yu.N., Ivanov D.O., Petrenko Yu. V., Puzyrev V.G.

Comparison of methods for calculating effective doses for children during CT examinations of the chest organs..98

Shleenkova E.N., Bazhin S.Yu., Kaidanovsky G.N., Chipiga L.A., Ilyin V.A.

About the requirements of regular monitoring of doses for the eye lens of the staff working with radiopharmaceuticals109

ISDCR AND RUSSIAN FEDERATION RADIATION-HYGIENE PASSPORTIZATION

Kormanovskaya T.A., Akhmatdinov R.R., Gorskiy G.A.

Results of the 20-year period of functioning of the Federal Databank on the natural radiation doses to the population of the Russian Federation124

BRIEF MESSAGES

Vodovатов A.V., Chipiga L.A., Piven P.A., Trufanov G.E., Berkovich G.V., Mashchenko I.A., Druzhinina P.S., Puzyrev V.G., Ryzhov S.A.

Assessment of the absorbed doses in the fetus from the computed tomography of the chest for the pregnant women133

JOURNAL OF RADIATION HYGIENE –

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS.....136

Модель расчета доз облучения клеток трахеобронхиального отдела при движении точечного источника бета-излучения

В.С. Репин

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

В статье предложены модель и метод расчета доз бета-облучения секреторных и базальных клеток трахеобронхиального отдела респираторного тракта при движении точечного источника бета-излучения активностью 1 Бк по внутренней поверхности респираторных образований. Количественно результаты расчетов выполнены на примере точечного источника ^{90}Y . В модели расчета доз учтены скорость перемещения источника излучения в каждом респираторном образовании, размеры респираторных образований и глубина залегания секреторных и базальных клеток. Расчеты выполнены для цилиндрической геометрической модели респираторного образования. При оценке доз рассматривались два вида клеток: клетки, облучаемые без выхода бета-частиц в просвет бронха (клетки типа 1), и клетки, облучаемые в результате выхода бета-частиц в просвет бронха (клетки типа 2). Результаты расчетов показали, что с возрастанием номера генерации (порядка ответвления респираторного образования) средние дозы облучения клеток типа 1 более чем в 10 раз больше клеток типа 2. С увеличением номера генерации в трахеобронхиальном дереве дозы на клетки увеличиваются на несколько порядков. Наибольшие дозы формируются в бронхиолах 9–15 генераций, достигая единиц и десятков миллиГрей. Несмотря на то, что с увеличением номера генерации общее число облучаемых клеток уменьшается, коллективные дозы облучения клеток (сумма доз на все клетки респираторного образования) в последних генерациях в 30–50 раз больше доз первых генераций. Таким образом, в случае единичного точечного источника имеет место существенный (на много порядков) разброс доз на отдельные клетки в отдельно взятом респираторном образовании, а также значительные различия в средних дозах трахеи, отдельных бронхов и бронхиол.

Ключевые слова: Чернобыльская авария, респираторный тракт, секреторные клетки, базальные клетки, горячие частицы, дозы бета-излучения.

Введение

В результате аварии на 4 энергоблоке Чернобыльской АЭС в окружающую среду было выброшено большое количество радионуклидов, приведшее к интенсивному радиоактивному загрязнению территории вокруг атомной станции [1–10]. В соответствии с данными, представленными в книге под редакцией Ю.А. Израэля, можно выделить 3 основных фазы выброса [4]:

- механической (вместе со взрывной волной);
- тепловой, характеризующийся интенсивным выходом летучих изотопов йода и цезия и распространением их на значительные расстояния;
- тепловой, высокотемпературный, происходивший в результате повышения температуры в активной зоне реактора более 1700°C и сопровождавшийся выносом продуктов деления в аэрозольной форме на частицах продуктов горения графита на дальние расстояния в соответствии с метеообстановкой.

Формирование радиационной обстановки в ближней зоне станции, в частности, в г. Припять, происходило посредством выпадения радионуклидов, в основном, в составе топливных частиц, образовавшихся в результате механического разрушения реактора.

Оценка доз внутреннего облучения за счет ингаляционного поступления радионуклидов оказалась одной из наиболее сложных задач по целому ряду причин.

Во-первых, в респираторный тракт в составе аэрозолей поступало одновременно большое количество радионуклидов.

Во-вторых, в органы дыхания жителей г. Припять поступали крупные аэрозоли.

Оценка доз облучения респираторного тракта стала предметом отдельного обсуждения в связи с так называемыми «горячими частицами» (ГЧ) – наиболее крупными топливными частицами, в составе которых поступали радионуклиды [11–19]. Суть обсуждений сводилась к

Репин Виктор Степанович

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

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

тому, чтобы выяснить радиобиологическое значение ГЧ, то есть дать ответ на вопрос, обладает ли отдельная ГЧ или множество ингалированных ГЧ более выраженным риском облучения по сравнению с риском, рассчитанным по модели, предложенной для расчетов доз облучения клеток респираторного тракта в публикации МКРЗ 66 [20]. Результаты сопоставления и анализа различных данных о последствиях равномерного и неравномерного облучения, полученные в исследованиях на животных при интратрахеальном введении радиоактивных аэрозолей различной дисперсности, в исследованиях с облучением кожи или плоских клеточных культур фибробластов мышей, представленные в обзоре 2003 г. [21] приводят к мысли, что нет оснований «драматизировать» последствия облучения горячими частицами, то есть риск облучения не больше, чем при равномерном облучении. В обзоре приводятся также экспериментальные данные, показывающие, что риск последствий облучения легких у мышей мелкодисперсными аэрозолями окиси ^{239}Pu при одинаковых дозах возрастает, при уменьшении размера аэрозолей. В работе 2007 г. [22] отмечено, что для окончательного вывода об опасности горячих частиц для людей пока мало эпидемиологических данных, поскольку мала вероятность поступления крупных частиц в глубокие отделы респираторного тракта, хотя и оснований для повышенного беспокойства также нет.

При ингаляционном поступлении радионуклидов для оценки дозы используется модель, опубликованная в 66 публикации МКРЗ [20], вышедшая в 1994 г. Разъяснения по ее практическому применению даны в руководстве МКРЗ, вышедшем в 2002 г. [23]. Последняя модификация данной модели представлена в публикации МКРЗ 130 (часть 1) в 2015 г. [24]. Важной особенностью применения модели МКРЗ является усреднение доз, полученных базальными и секреторными клетками за период пребывания отложившихся аэрозолей в отделах респираторного тракта. Для оценки доз используется понятие поглощенной фракции энергии $AF(T \leftarrow S)$, то есть части энергии, испущенной источником, находящемся в органе, – источнике S и поглощенной в органе-мишени T (чувствительные к излучению клетки). Расчет $AF(T \leftarrow S)$ выполнен для цилиндрической геометрии, описывающей форму респираторных образований. Для сценария равномерного распределения активности по внутренней поверхности респираторного образования мощность поглощенной дозы на клетки бронхов и бронхиол рассчитывается, согласно [24] по формуле (1):

$$\dot{H}_T(t) = q(t) \cdot SEE(T \leftarrow S), \quad (1)$$

где $SEE(T \leftarrow S)$ – удельная эквивалентная доза в ткани-мишени на одно радиоактивное превращение источника S с активностью $q(t)$;

$$SEE(T \leftarrow S) = \frac{Q_i \cdot Y_i \cdot E_i \cdot AF(T \leftarrow S)}{M_T}, \quad (2)$$

где Q_i – коэффициент качества i -го излучения;

Y_i – выход i -го излучения на одно радиоактивное превращение;

E_i – средняя энергия i -го излучения;

$AF(T \leftarrow S)$ – фракция поглощенной энергии.

Ожидаемая эквивалентная доза на бронхи или бронхиолы за период с момента поступления радиоактивных

аэрозолей – t_0 до возраста 70 лет рассчитывается по формуле 3:

$$H_T = \int_{t_0}^{70} \dot{H}_T(t) dt \quad (3)$$

Рассчитываемые по формулам 1–3 эквивалентные дозы облучения отделов респираторного тракта, к сожалению, не дают полного представления о дозах облучения отдельных чувствительных к излучению клеток, выстилающих поверхность респираторного тракта, и количестве клеток, попадающих в тот или иной дозовый диапазон. Используемая в публикации 66 МКРЗ модель расчета дозы, основанная на сценарии равномерного распределения активности на внутренней поверхности респираторного образования, заведомо не дает представления о дозах от отдельной аэрозольной частицы (точечного источника) или от множества одновременно перемещаемых по трахеобронхиальному дереву частицам.

Цель исследования – расчет доз облучения секреторных и базальных клеток трахеобронхиального отдела респираторного тракта при движении отдельного точечного бета-источника.

Материалы и методы

Схема расчета доз при движении точечного источника по внутренней поверхности респираторного образования (трахея, бронх, бронхиола) включала разработку методического подхода и алгоритма, непосредственное проведение расчетов и анализ полученных результатов.

В основу настоящих расчетов, так же, как и в публикации МКРЗ-66 [20], положена цилиндрическая конфигурация отдельных образований трахеобронхиального отдела (ТБО). Размеры отдельных респираторных образований (РО) от трахеи до 15 генерации (порядок ответвления очередного РО) и их количественная характеристика, приведенные в таблице 1, аналогичны данным, представленным в публикации МКРЗ-66.

В отличие от модели МКРЗ-66, в которой скорость очистки отделов респираторного тракта дана в единицах периода полураспада, в данной работе использовалась скорость мукоцилиарной очистки, рассчитываемая для каждой генерации по формуле, заимствованной из работы [29]:

$$V_{cl} = 0.0105 \cdot 2^{\left(-2 \cdot \frac{N_{gen}}{3}\right)}, \quad (4)$$

где V_{cl} – скорость мукоцилиарной очистки, см/с;

N_{gen} – номер генерации.

Такой подход позволяет точнее оценить время нахождения точечного источника в пределах отдельного респираторного образования.

Время перемещения точечного источника t_{cl} (в секундах) от начала до конца каждого РО, представленное в таблице 1, рассчитывалось посредством деления его длины $L(N_{gen})$ на соответствующую скорость $V_{cl}(N_{gen})$.

В соответствии с моделью МКРЗ-66 [20] между источником и мишенью облучения располагается слой слизи, реснитчатый слой и слой эпителия. В зависимости от номера генерации суммарная толщина этих слоев, а значит, и глубина залегания секреторных и базальных клеток, различаются. В таблице 1 приведены средние значения толщины слоя, поглощающего бета-излучение, под которым расположены клетки-мишени.

Характеристика респираторных образований трахеобронхиального отдела респираторного тракта взрослого человека

Таблица 1

[Table 1]

Characteristics of respiratory masses of the adult tracheobronchial respiratory tract]

Номер генерации [Generation number]	Диаметр РО, см [Diameter, cm]	Длина РО, см [Length, cm]	Глубина залегания секреторных клеток, см [Depth of secretory cells, cm]	Глубина залегания базальных клеток, см [Depth of basal cells, cm]	Число образо- ваний в генерации [The number of formations in the generation]	Время прохож- дения образова- ния, с [Time of passage of formation, sec]	Число клеток [Number of cells]	В том числе [Including]	
								Секреторных [Secretory]	Базальных [Basal]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	1,65	9,1	2,50E-03	4,00E-03	1	1375,7	47171000	31447333	15723667
1	1,2	3,8	2,50E-03	4,00E-03	2	911,94	14326000	9550667	4775333
2	0,85	1,5	2,50E-03	4,00E-03	4	571,43	4005500	2670333	1335167
3	0,61	0,83	2,50E-03	4,00E-03	8	501,92	1590600	1060400	530200
4	0,44	0,9	2,50E-03	4,00E-03	16	863,95	1244100	829400	414700
5	0,36	0,81	2,50E-03	4,00E-03	32	1234,3	916090	610727	305363
6	0,29	0,66	2,50E-03	4,00E-03	64	1596,5	601300	400867	200433
7	0,24	0,6	2,50E-03	4,00E-03	128	2303,9	452390	301593	150797
8	0,2	0,53	2,50E-03	4,00E-03	256	3230,5	333010	222007	111003
9	0,1651	0,4367	8,00E-04	0	512	4225,3	226510		
10	0,1348	0,362	8,00E-04	0	1024	5560	153300		
11	0,1092	0,3009	8,00E-04	0	2048	7336,2	103230		
12	0,0882	0,25	8,00E-04	0	4096	9675,6	69272		
13	0,072	0,2069	8,00E-04	0	8092	12711	46800		
14	0,0603	0,17	8,00E-04	0	16184	16579	32204		
15	0,0533	0,138	8,00E-04	0	32000	21364	23108		

Количество облучаемых клеток-мишеней, выстилающих внутреннюю поверхность, также зависит от размеров РО. Расчет их количества N_{cell} производился по формуле:

$$N_{cell} = \pi \cdot (D(N_{gen}) + 2 \cdot \Delta d(N_{gen}))/s_{cell} \quad (5)$$

где $D(N_{gen})$ – диаметр соответствующего номеру генерации образования, см;

$\Delta d(N_{gen})$ – толщина поглощающего слоя, см

s_{cell} – средняя площадь клеток-мишеней, принятая равной 0,000001 см².

Результаты расчета числа клеток для образования соответствующей генерации даны в таблице 1.

Расчет числа базальных и секреторных клеток (см. табл. 1) выполнен по соотношению их масс в трахеобронхиальном отделе, приведенных в публикации МКРЗ-66.

Упрощенная двумерная методическая схема (проекция трехмерного изображения), поясняющая подход к расчету поглощенной дозы на отдельные клетки-мишени, показана на рисунке 1. В соответствии с данной схемой бета-частицы точечного источника вылетают из точки (1) под разными углами. Часть бета-частиц не выходит в просвет РО (углы вылета ниже линии б), а часть выходит в просвет. В последнем случае часть пробега бета-части-

цы происходит в воздухе (2), а часть – в слое поглощения (4). Точка входа в слой поглощения (3) разделяет среды поглощения и позволяет рассчитать отдельно длины пробега в воздухе и в ткани.

Схема трехмерной геометрии облучения клеток ТБО показана на рисунке 2. Из рисунка 2 видно, что пробеги бета-частиц в трехмерном представлении модели облучения могут быть больше пробегов, показанных на рисунке 2. Для расчета полного пробега (r) бета-частицы от точечного источника с координатами на внутренней поверхности цилиндра X_0 , Y_0 и Z_0 до клетки мишени на поверхности внешнего цилиндра с координатами x , y , z используется следующая формула:

$$r = \sqrt{(x - X_0)^2 + (y - Y_0)^2 + (z - Z_0)^2} \quad (6)$$

Для определения координат точек входа в слой поглощения при движении бета-частицы к конкретным координатам клетки-мишени и для расчета длин пробега в воздухе и в поглотителе производятся следующие расчеты (см. рис. 2):

$$\tan \alpha = \frac{y - Y_0}{x} \quad (7)$$

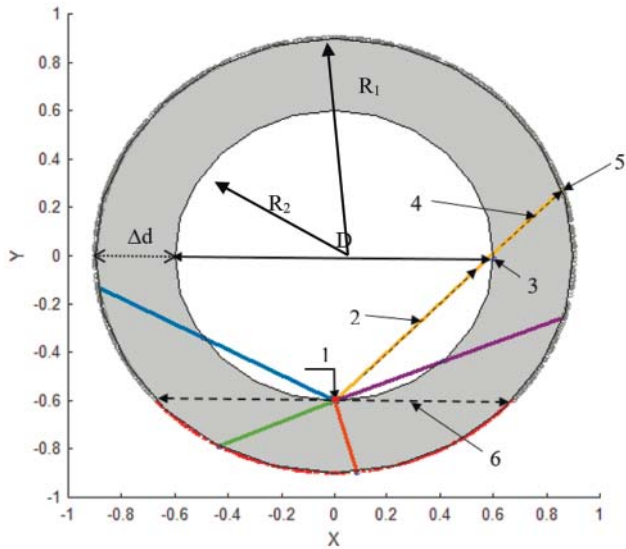


Рис. 1. Двумерная схема, поясняющая подход к расчету поглощенной дозы на отдельные клетки-мишени: 1 – точечный источник; 2 – часть пробега бета частицы в просвете бронха; 3 – точка входа бета-частицы в стенку бронха; 4 – часть пробега бета-частицы в стенке бронха; 5 – облучаемая клетка; 6 – линия, ниже которой бета-частицы не выходят в просвет бронха; D и R2 – диаметр и радиус бронха; R1 – средний радиус залегания секреторных или базальных клеток; Δd – толщина слоя поглощения

[Fig. 1. Two-dimensional diagram explaining the approach to calculating the absorbed dose for individual target cells: 1 – point source; 2 – part of the path of beta particles in the lumen of the bronchus; 3 – the entry point of beta particles into the bronchial wall; 4 – part of the path of beta particles in the bronchial wall; 5 – exposing cells; 6 – the line below which beta particles do not enter the bronchial lumen; D and R2 – diameter and radius of the bronchus; R1 – average radius of secretory or basal cells; Δd – the thickness of the absorption layer]

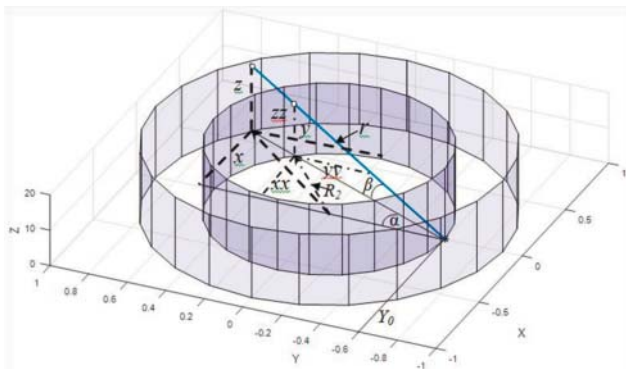


Рис. 2. Схема расчета длин пробегов бета частицы до клетки-мишени в воздухе и поглотителе (все обозначения на рисунке соответствуют формулам 7–12)

[Fig. 2. Scheme for calculating of the beta particle length path in air and absorber (all symbols in the figure correspond to formulas 7–12)]

Координата xx точки входа в слой поглощения находится по формуле 8:

$$xx = \frac{-2 \cdot Y_0 \cdot \tan \alpha}{(1 + \tan^2 \alpha)} \quad (8)$$

Координату yy точки входа вычисляем по формуле 9:

$$yy = \sqrt{R_2^2 - xx^2} \quad (9)$$

Координату zz точки входа вычисляем по формуле 10:

$$zz = \sqrt{xx^2 - (yy - Y_0)^2} \cdot \tan \beta + Z_0 \quad (10)$$

Проведенные вычисления позволяют рассчитать длину пробега бета-частицы в воздухе от точечного источника с координатами X_0 , Y_0 и Z_0 до точки входа в слой поглощения с координатами xx , yy , zz :

$$r_{air} = \sqrt{(xx - X_0)^2 + (yy - Y_0)^2 + (zz - Z_0)^2} \quad (11)$$

Вычитая из суммарной длины пробега бета-частицы пробег в воздухе r_{air} , получим длину пробега в ткани респираторного образования r_{tis} от точки входа до клетки-мишени:

$$r_{tis} = r - r_{air} \quad (12)$$

Расчет доз облучения клеток мишеней выполнен с использованием дозовой функции ослабления мощности дозы $Jr(Rm)$ в воде, табулированные значения которой заимствованы из публикации W.G. Cross et al [26]. Данный метод расчета, описанный в работах [27, 28], использовался при разработке дозиметрической модели публикации 66 МКРЗ. Вид этой функции на примере ^{90}Y приведен на рисунке 3. Особенность данной функции заключается в том, что значения мощности дозы на каждом расстоянии умножены на квадрат этого расстояния, что позволяет избежать резких ее изменений на малых расстояниях.

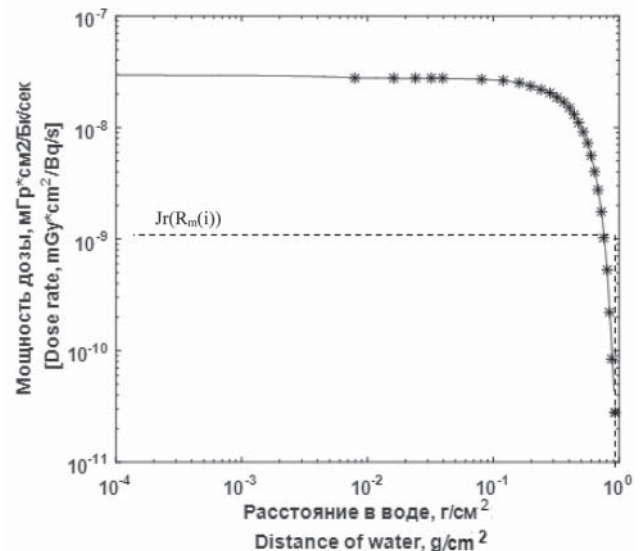


Рис. 3. Функция (Jr) ослабления мощности дозы ^{90}Y в воде (по данным [26])

[Fig. 3. Dose rate attenuation function of ^{90}Y in water (according to [26])]

Расчет суммарного поглощения бета-излучения в воздухе и в ткани в массовых единицах выполнен с учетом их плотности в г/см^3 :

$$R_m = \rho_{air} \cdot r_{air} + \rho_{tis} \cdot r_{tis}, \quad (13)$$

где ρ_{air} – плотность воздуха, принятая равной $0,0012 \text{ г/см}^3$;

r_{air} – длина пробега бета-частицы в воздухе, см;
 ρ_{tis} – плотность ткани стенок респираторного образования, принятая равной плотности воды 1 г/см³;
 r_{tis} – длина пробега бета-частицы в стенке респираторного образования, см.

Допускается, что добавка поглощения в воздухе к поглощению в воде не внесет существенной погрешности при использовании дозовой функции для воды для суммарного поглощения в двух средах.

Полный расчет мощностей доз облучения всех клеток РО включает оценку длин пробега от текущего положения точечного источника до каждой облучаемой клетки, рассчитанных в единицах массовой плотности (рис. 4).

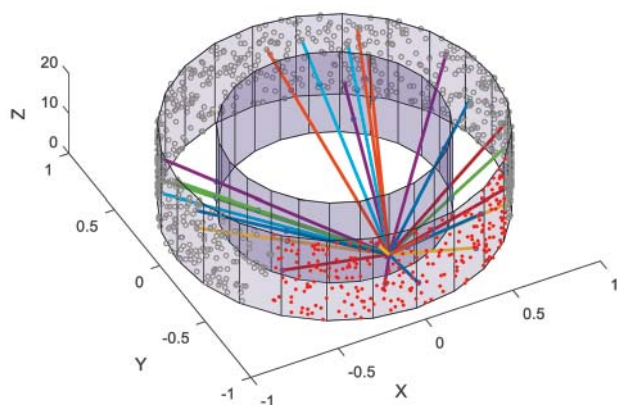


Рис. 4. Иллюстрация схемы расчета доз на клетки респираторного образования
[Fig. 4. Illustration of the scheme for calculating doses to cells of a respiratory unit]

Оценка текущего значения дозовой функции $Jr(R_m)$, представленной на рисунке 3, производилась методом линейной интерполяции.

Мощность дозы для i -й клетки рассчитывалась путем деления $Jr(R_m(i))$ на квадрат расстояния от текущего положения точечного источника до i -й клетки:

$$DR(i) = \frac{Jr(R_m(i))}{r(i)^2} \quad (14)$$

где $DR(i)$ – мощность дозы облучения i -й клетки, МГр·с⁻¹;

Jr – функция ослабления мощности дозы ^{90}Y в воде, МГр·см²·Бк⁻¹·с⁻¹;

$R_m(i)$ – текущее значение пробега в единицах массовой плотности, г·см⁻²;

$r(i)$ – текущее значение длины пробега бета-частицы от точечного источника до i -й клетки-мишени, рассчитываемое по формуле (3).

Учитывая, что точечный источник движется со скоростью V_{cp} , его новое положение приводит к необходимости производить новый расчет мощностей доз на те же клетки.

Алгоритм расчета движущейся частицы включал деление пути движения точечного источника на 200 одинаковых отрезков. Время прохождения каждого отрезка пути Δt_i рассчитывалось путем деления полного времени прохождения респираторного образования (см. табл. 1) на 200. Суммарная доза на отдельную клетку рассчитывалась при этом по формуле:

$$D_i = \sum_{i=1}^{200} DR_i \cdot \Delta t_i \quad (15)$$

Расчет суммарной дозы SD на все клетки респираторного образования после прохождения точечного источника производился по формуле:

$$SD = \sum_i D_i \quad (16)$$

Средняя доза на клетки респираторного образования после прохождения точечного источника рассчитывалась по формуле:

$$\bar{D} = \frac{SD}{N_{cell}}, \quad (17)$$

где SD – суммарная доза облучения всех клеток РО за время прохождения точечного источника, МГр;

N_{cell} – количество базальных или секреторных клеток в соответствующем респираторном образовании.

Алгоритм расчета доз был реализован средствами Matlab R2020b. Компьютерный код включал генерацию 400 000 случаев распределения случайным образом координат расположения секреторных или базальных клеток на соответствующей глубине от внутренней поверхности РО, разделение длины пробега на 200 отрезков, расчет для каждого из 200 положений точечного источника активностью 1 Бк доз на все клетки, которых бета-частицы достигают в процессе поглощения на пути пробега.

Результаты и обсуждение

На рисунке 5 показаны 3 случая конфигурации облучаемых клеток трахеи в процессе перемещения точечного источника ^{90}Y .

Как видно из рисунка 5, для крупного респираторного образования, каким является трахея, бета-частицы ^{90}Y не достигают ряда клеток. При облучении мелкого респираторного образования при любом положении точечного источника все клетки попадают в поле облучения (рис. 6)

На каждом шаге перемещения точечного источника происходит суммирование доз на клетки, попадающие под разными углами в поле облучения. Таким образом, к концу перемещения точечного источника представляется возможным построить гистограмму распределения числа клеток по дозовым интервалам, рассчитать число облучаемых клеток, максимальную и среднюю дозу, а также суммарную дозу облучения всех клеток (коллективная клеточная доза).

На рисунке 7 показаны частотные распределения числа клеток по дозовым интервалам для трахеи, бронха 8 генерации и бронхиолы 15 генерации.

Из рисунка 7 видно, что с уменьшением размеров респираторного образования дозы облучения возрастают, но при этом уменьшается число облучаемых клеток. Количественная характеристика облучения секреторных и базальных клеток трахеобронхиального отдела дана в таблицах 2 и 3. Из всего перечня облучаемых клеток выделены клетки, облучаемые без выхода бета-излучения в просвет РО, то есть ближе всего расположенные к точечному источнику (названные для упрощения клетками типа 1), и клетки, облучаемые при выходе бета-частиц в просвет бронха (клетки типа 2). Уровни облучения клеток ТБО выражены средними и максимальными значениями каждого типа клеток и коллективными клеточными дозами, рассчитанными как сумма доз на все клетки.

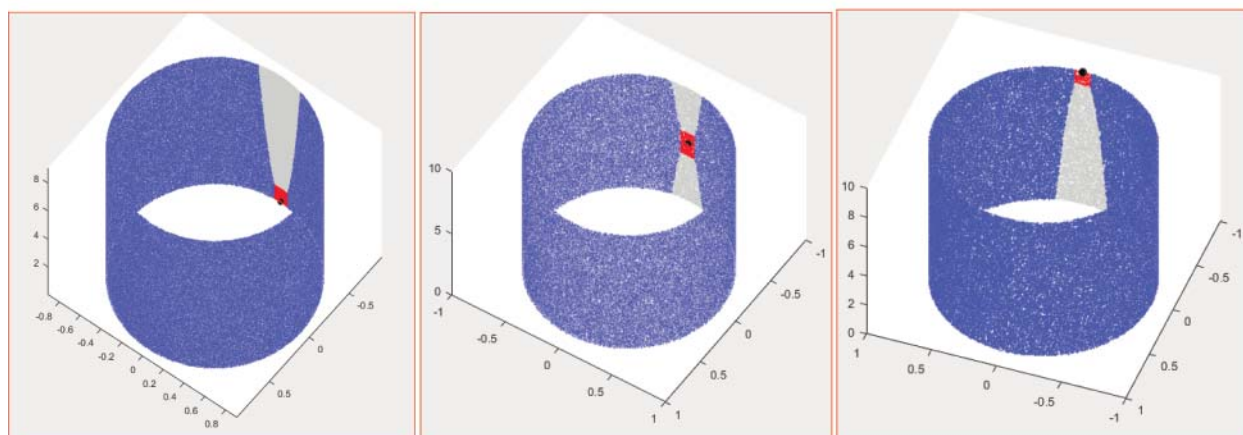


Рис. 5. Распределение облучаемых клеток трахеи под слоем поглощения при положении точечного источника ^{90}Y в начале (слева), в середине и в конце (справа). Красным цветом на рисунке показана конфигурация клеток, облучаемых без выхода бета-частиц в просвет трахеи

[Fig. 5. Distribution of irradiated tracheal cells under the absorption layer at the point source position at the beginning (left), in the middle and at the end (right). The configuration of cells irradiated without beta particle escape into the tracheal lumen is shown in red]

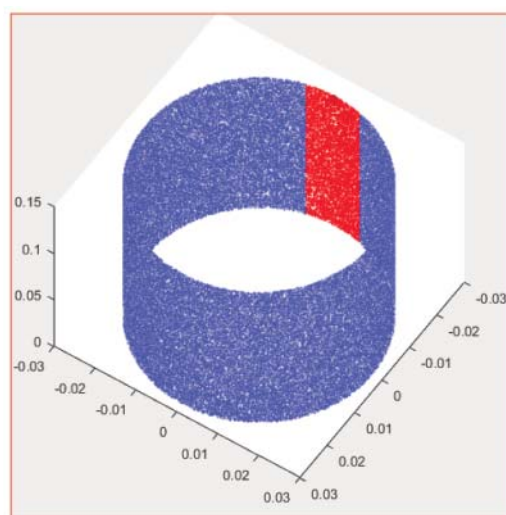


Рис. 6. Распределение облучаемых клеток бронхиолы 15-й генерации при положении точечного источника ^{90}Y в конце. Красным цветом на рисунке показана конфигурация клеток, облучаемых без выхода бета-частиц в просвет бронхиолы

[Fig. 6. Distribution of irradiated cells of the 15th generation bronchiole at the point source position at the beginning. The configuration of cells irradiated without beta particle escape into the bronchiole lumen is shown in red]

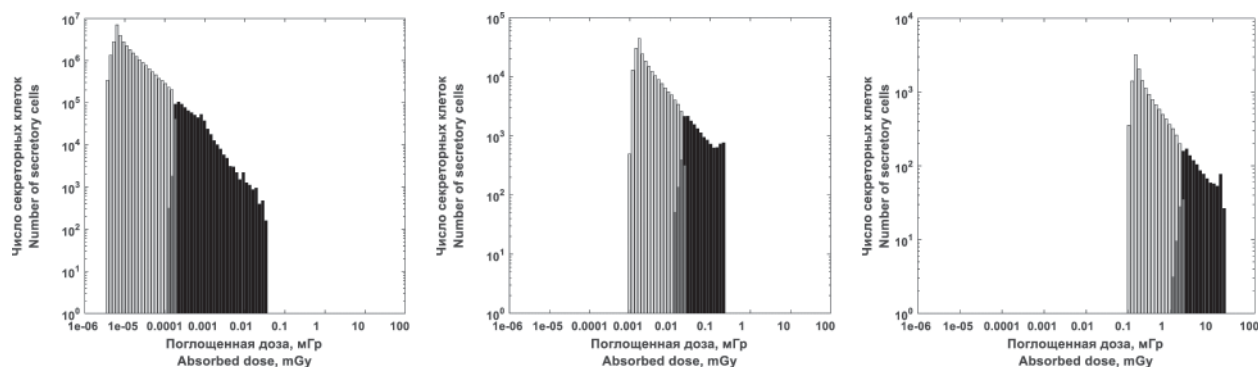


Рис. 7. Частотные распределения доз облучения секреторных клеток за время перемещения точечного источника ^{90}Y активностью 1 Бк: трахея (слева); бронх 8-й генерации (посередине); бронхиола 15-й генерации (справа)

[Fig. 7. Frequency distributions of radiation doses to secretory cells during movement of a ^{90}Y point source with the activity 1 Bq: trachea (left); the 8th generation bronchus (middle); the 15th generation bronchiole (right)]

Число облучаемых секреторных клеток и дозы облучения после прохождения точечного источника ^{90}Y активностью 1 Бк по респираторным образованиям трахеобронхиального отдела

Таблица 2

[Table 2]

Number of exposed secretory cells and absorbed doses after a ^{90}Y point source with activity of 1 Bq has passed through the respiratory formations of the tracheobronchial region

№ генерации [Generation number]	Время прохождения, с [Moving time, s]	Число клеток (тип 1) ¹⁾ [Number of cells (type 1)] ¹⁾	Суммарная доза клеток типа 1, мГр [Total dose of type 1 cells, mGy]	Число клеток (тип 2) ²⁾ [Number of cells (type 2)] ²⁾	Суммарная доза клеток типа 2, мГр [Total dose of type 2 cells, mGy]	Средняя доза клеток типа 1, мГр [Average dose of type 1 cells, mGy]	Средняя доза клеток типа 2, мГр [Average dose of type 2 cells, mGy]	Средняя доза на все клетки, мГр [Average dose per all cells, mGy]	Максимальная доза клеток типа 1, мГр [Maximum dose of type 1 cells, mGy]	Максимальная доза клеток типа 2, мГр [Maximum dose of type 2 cells, mGy]
0	1375,7	8,1E+04	1,5E+00	3,0E+07	5,0E+02	7,6E-04	1,7E-05	3,6E-05	2,8E-02	1,8E-04
1	911,94	6,6E+04	2,7E+00	9,2E+06	3,0E+02	1,4E-03	3,3E-05	7,4E-05	2,2E-02	3,3E-04
2	571,43	5,7E+04	4,9E+00	2,6E+06	1,5E+02	2,5E-03	6,2E-05	1,5E-04	1,7E-02	6,4E-04
3	501,92	4,4E+04	8,2E+00	1,0E+06	1,2E+02	4,5E-03	1,2E-04	3,0E-04	2,3E-02	1,2E-03
4	863,95	4,0E+04	1,5E+01	8,0E+05	2,1E+02	8,0E-03	2,8E-04	6,5E-04	3,6E-02	2,3E-03
5	1234,3	3,2E+04	2,3E+01	5,9E+05	3,0E+02	1,3E-02	5,4E-04	1,2E-03	5,7E-02	4,1E-03
6	1596,5	2,4E+04	3,2E+01	3,8E+05	3,7E+02	2,3E-02	1,0E-03	2,3E-03	8,8E-02	7,2E-03
7	2303,9	2,0E+04	5,0E+01	2,9E+05	5,3E+02	3,9E-02	2,0E-03	4,3E-03	1,4E-01	1,3E-02
8	3230,5	1,7E+04	1,1E+02	2,0E+05	1,1E+03	6,5E-02	3,6E-03	8,0E-03	2,2E-01	2,2E-02
9	4225,3	1,0E+04	1,1E+02	2,2E+05	1,8E+03	2,5E-01	8,5E-03	1,9E-02	1,3E+00	7,0E-02
10	5560	7,5E+03	1,5E+02	1,5E+05	2,2E+03	4,2E-01	1,6E-02	3,6E-02	2,0E+00	1,2E-01
11	7336,2	5,6E+03	2,1E+02	9,9E+04	2,9E+03	7,2E-01	3,0E-02	6,8E-02	3,0E+00	2,2E-01
12	9675,6	4,3E+03	3,1E+02	6,6E+04	3,6E+03	1,2E+00	5,8E-02	1,3E-01	4,5E+00	3,8E-01
13	12711	3,2E+03	4,4E+02	4,5E+04	4,5E+03	2,0E+00	1,1E-01	2,4E-01	7,1E+00	6,7E-01
14	16579	2,4E+03	6,0E+02	3,1E+04	5,7E+03	3,4E+00	2,0E-01	4,3E-01	1,1E+01	1,2E+00
15	21364	1,8E+03	8,0E+02	2,2E+04	6,9E+03	5,6E+00	3,4E-01	7,5E-01	1,8E+01	1,9E+00

¹⁾ клетки типа 1 – клетки, облучаемые без выхода бета-частиц в просвет респираторного образования; [1] type 1 cells – cells exposed without beta particles escaping into the lumen of the respiratory formation;

²⁾ клетки типа 2 – клетки, облучаемые в результате выхода бета-частиц в просвет респираторного образования; [2] type 2 cells – cells irradiated as a result of beta particles escaping into the lumen of the respiratory formation.]

Таблица 3
Число облучаемых базальных клеток и дозы облучения после прохождения точечного источника ^{90}Y активностью 1 Бк
по респираторным образованиям трахеобронхиального отдела

Table 3
Number of exposed basal cells and expose doses after a ^{90}Y point source with activity of 1 Bq has passed through the respiratory formations of the tracheobronchial region

№ генерации [Gene-ration number]	Время прохождения, с [Moving time, s]	Число клеток (тип 1) ¹ [Number of cells (type 1)] ¹	Суммарная доза клеток типа 1, мГр [Total dose of type 1 cells, mGy]	Число клеток (тип 2) ² [Number of cells (type 2)] ²	Суммарная доза клеток типа 2, мГр [Total dose of type 2 cells, mGy]	Средняя доза клеток типа 1, мГр [Average dose of type 1 cells, mGy]	Средняя доза клеток типа 2, мГр [Average dose of type 2 cells, mGy]	Средняя доза на все клетки, мГр [Average dose per all cells, mGy]	Максимальная доза клеток типа 1, мГр [Maximum dose of type 1 cells, mGy]	Максимальная доза клеток типа 2, мГр [Maximum dose of type 2 cells, mGy]
0	1375,7	47984	8,6E-01	1,5E+07	2,2E+02	5,7E-04	1,6E-05	3,3E-05	1,2E-02	1,3E-04
1	911,94	41801	1,5E+00	4,5E+06	1,3E+02	1,0E-03	3,1E-05	6,6E-05	9,2E-03	2,5E-04
2	571,43	35127	2,8E+00	1,3E+06	6,9E+01	1,8E-03	5,6E-05	1,3E-04	9,0E-03	4,9E-04
3	501,92	27652	4,6E+00	5,1E+05	5,2E+01	3,2E-03	1,1E-04	2,7E-04	1,3E-02	9,3E-04
4	863,95	25349	8,7E+00	3,9E+05	9,5E+01	5,7E-03	2,6E-04	5,9E-04	2,1E-02	1,8E-03
5	1234,3	20581	1,3E+01	2,9E+05	1,3E+02	9,7E-03	4,9E-04	1,1E-03	3,4E-02	3,1E-03
6	1596,5	15119	1,8E+01	1,9E+05	1,6E+02	1,6E-02	9,3E-04	2,1E-03	5,3E-02	5,6E-03
7	2303,9	12463	2,8E+01	1,4E+05	2,3E+02	2,8E-02	1,8E-03	3,9E-03	8,4E-02	9,7E-03
8	3230,5	10010	4,1E+01	1,0E+05	3,1E+02	4,7E-02	3,3E-03	7,1E-03	1,3E-01	1,7E-02

¹) клетки типа 1 – клетки, облучаемые без выхода бета-частиц в просвет респираторного образования; [¹] type 1 cells – cells exposed without beta particles escaping into the lumen of the respiratory formation;

²) клетки типа 2 – клетки, облучаемые в результате выхода бета-частиц в просвет респираторного образования; [²] type 2 cells – cells irradiated as a result of beta particles escaping into the lumen of the respiratory formation.]

Закключение

Результаты, приведенные в таблицах 2 и 3 и на рисунках 8 и 9, позволяют сделать несколько выводов:

1. С возрастанием номера генерации средние дозы облучения секреторных и базальных клеток за время полного перемещения точечного источника ^{90}Y активностью 1 Бк по респираторному образованию увеличиваются на несколько порядков. Наибольшие дозы формируются в бронхиолах 9–15 генераций, достигая единиц и десятков мГр (см. табл. 2 и 3, колонки 7–11, рис. 8).

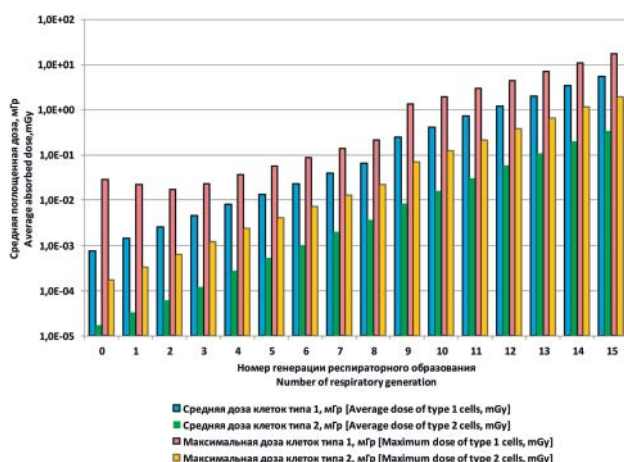


Рис. 8. Диаграмма доз облучения секреторных клеток
[Fig. 8. Diagram of dose exposure of respiratory cells]

2. Средние дозы облучения секреторных клеток в трахее и бронхах больше средних доз облучения базальных клеток примерно на 40% для клеток, облучаемых без выхода бета-частиц в просвет респираторного образования, и на 10% – для клеток, облучаемых в результате выхода бета-частиц в просвет РО (см. табл. 2 и 3, колонки 7–8).

3. С увеличением номера генерации соотношение максимальных и средних доз уменьшается в 1,5–10 раз (см. табл. 2 и 3, колонки 7–8 и 10–11).

4. С увеличением номера генерации общее число облучаемых клеток уменьшается (см. табл. 2 и 3, колонки 3 и 5), а суммарные дозы клеток, облучаемых без выхода бета-частиц в просвет респираторного образования и клеток, облучаемых в результате выхода бета-частиц в просвет, возрастают, при этом дозы в последних генерациях в 30–50 раз больше доз первых генераций (см. табл. 2 и 3, колонки 4 и 6, рис. 9).

5. Представленные выводы относятся только к дозам от отдельного точечного источника и не распространяются на случай поступления в респираторный тракт большого числа частиц.

Представленный выше подход к оценке доз облучения клеток респираторного тракта показал, что имеет место существенный (на много порядков) разброс доз на отдельные клетки в отдельном респираторном образовании, а также значительные различия в средних дозах трахеи, отдельных бронхов и бронхиол. Дальнейшее развитие предложенной модели и метода планируется применить для случая поступления в легкие большого числа частиц, распределенных по отделам респираторного тракта, для ретроспективной оценки доз от «черно-

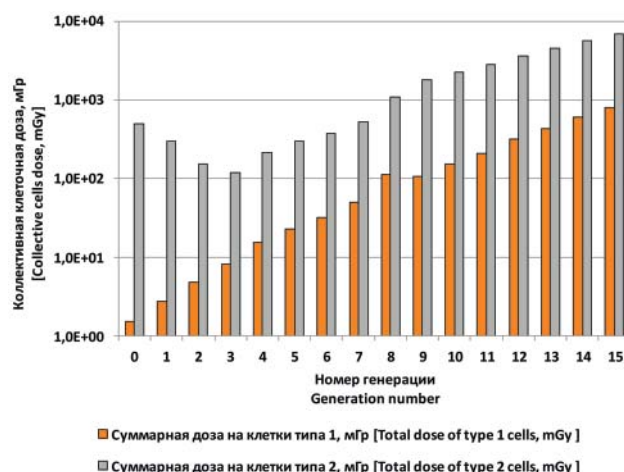


Рис. 9. Коллективные клеточные дозы в различных генерациях респираторного тракта: клетки типа 1 – клетки, облучаемые без выхода бета-частиц в просвет респираторного образования; клетки типа 2 – клетки, облучаемые в результате выхода бета-частиц в просвет респираторного образования

[Fig. 9. Collective cellular doses in different generations of the respiratory tract: type 1 cells – cells exposed without beta particles escaping into the lumen of the respiratory formation; type 2 cells – cells irradiated as a result of beta particles escaping into the lumen of the respiratory formation]

больших» частиц, а также для сравнения полученных доз с дозами, рассчитанными по стандартной модели МКРЗ.

Литература

1. Авария на ЧАЭС и ее последствия: Информация // Совещание экспертов МАГАТЭ, Вена, 25 – 29 августа 1986 г. М.: ГКАЭ СССР, 1986. 86 с.
2. Chernobyl Reactor Accident: Report of a Consultation 6 May 1986 (provisional) // World Health Organization. ICP/CEH 129. Copenhagen, 1986. 37 p.
3. Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и ее последствиях, подготовленная для МАГАТЭ // Атомная энергия. 1986. Т. 61, Вып. 5. С. 301–320.
4. Израэль Ю.А., Петров В.Н., Северов Д.А. Моделирование радиоактивных выпадений в ближней зоне от аварии на ЧАЭС // Метеорология и гидрология. 1987. N 7.
5. Асмолов В.Г., Боровой А.А., Демин В.Ф., и др. Авария на Чернобыльской АЭС: год спустя // Атомная энергия. 1988. Т. 64, Вып. 1. С. 3–23.
6. Begichev S.N., Borovoj A.A., Burlakov E.V., et al. Radioactive releases due to the Chernobyl accident // Fission Product Transport Process in Reactor Accidents: International Seminar, Dubrovnik, 22 – 26 may 1989 y. Dubrovnik, 1989. 37 p.
7. Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред / Под ред. Ю.А. Израэля. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1990. 296 с.
8. Международный чернобыльский проект. Оценка радиологических последствий и защитных мер // Доклад Международного консультативного комитета. МАГАТЭ, Вена, 1992. С. 83–92.
9. Borzilov V.A., Klepikova N.V. Effect of Meteorological Conditions and Release Compositions on Radionuclide Deposition After Chernobyl Accident // The Chernobyl Papers. V. 1. Doses to the Soviet Population and Early Health Effects Studies / by S.E. Merwin, M.I. Balonov Editors // Research Enterprises, 1993. - P. 47–68.
10. Международный Чернобыльский проект. Оценка радиологических последствий и защитных мер // Доклад

- Международного консультативного комитета. IAEA, Вена, 1992. 740 с.
11. Stannard J.N. Radioactivity and health – a history / Ed. R.W. Baalman. Siettle: Pathific Northwest Laboratory, 1988. P. 641-651.
 12. Grinborg J.E., Linborg L., Tilikidis A. Dosimetry around Hot Particles with microdosimetric Techniques // National Institute of Radiation Protection: Preprint. Stockholm, 1988. 21 p.
 13. Меленевский А.Э. “Горячие” частицы – продукты аварии на Чернобыльской АЭС и их онкогенная опасность // Докл. АН Украины, 1992. № 1. С. 138-143.
 14. Burkart W. Dose and health implications from particulate radioactivity (hot particles) in the environment // Hot particles from Chernobyl fallout: Proceeding of an international workshop, Theuern, 28-29 Oct. 1987. Vienna.: IAEA, 1987. P. 121-130.
 15. Hofmann W., Crawford-Brown D.J., Martonen T.B. The radiological significance of beta emitting hot particles released from Chernobyl nuclear power plant // Radiation Protection Dosimetry. 1988. V. 22, N 3. P. 149-157.
 16. Demchuk V.V., Voytsekhovich O.V., Kashparov V.A., Viktorova N.V., Laptev G.V. Analysis of Chernobyl fuel Particles and their migration Characteristics in Water and Soil // Seminar on Comparative Assessment of Environmental Impact of Radionuclides Released during Three Major Nuclear Accidents: Kyshtym, Windscale, Chernobyl: Luxemburg, 1-5 October 1990. Luxemburg, 1991. V. 1. P. 493-514.
 17. Falk R., Suomela J., Kerekes A.A. Study of Hot Particles collected in Swiden one year after Chernobyl Accident // Journal of Aerosol Science. 1988. P. 1339-1342.
 18. Бондаренко О.А., Лось И.П., Зеленский А.В. Распространенность горячих частиц на территории УССР после аварии на ЧАЭС // Тез. докл. I Всесоюз. радиобиол. съезда, Москва, 21-27 авг. 1989. М.: Б.и., 1989. Т. 2. С. 476.
 19. Likhtaryov I.A., Repin V.S., Bondarenko O.A. and Nechaev S.Yu. Radiological effects after inhalation of highly radioactive fuel particles produced by the Chernobyl accident // Radiation Protection Dosimetry. Volume 59. № 4, P. 247–254.
 20. The International Commission on Radiological Protection. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection // ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24 (1-3). 1994.
 21. Charles M.W., Mill A.J., Darley P.J. Carcinogenic risk of hot-particle exposures // Radiation Protection Dosimetry. 2003. Vol. 23, № 1. P. 5–28
 22. Charles M.W., Harrison J.D. Hot particle dosimetry and radiobiology-past and present // Journal of Radiological Protection. 2007. Vol. 27, № 3a. P. 97-109.
 23. Guide for the Practical Application of the ICRP Human Respiratory Tract Model. ICRP Supporting Guidance 3. Ann. ICRP. 2002. 32 (1-2).
 24. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1. ICRP Publication 130. Ann. ICRP. 2015. 44(2).
 25. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides – Part 1. ICRP Publication 56. Ann. ICRP. 1990. 20 (2).
 26. Cross W.G., Freedman N.O., Wong P.Y. Beta-ray Dose Distributions from Point Sources in an Infinite Water Medium // Health Physics. 1992. Vol. 63, № 2. P. 160-171.
 27. James A.C., Gehr P., Masse R., et al. Dosimetry Model for Bronchial and Extrathoracic Tissues of the Respiratory Tract // Radiation Protection Dosimetry. 1991. Vol. 37, № 4. P. 221–230.
 28. A. Birchall, M.R. Bailey, A.C. James. LUDEP: A Lung Dose Evaluation Program // Radiation Protection Dosimetry. 1991. Vol. 38, Issue 1-3. P. 167–174.
 29. Fedorovich G.V. Model of pulmonary mucociliary clearance // Pulmonology. 2016. Vol. 26, № 2. P. 222-230.

Поступила: 04.08.2021 г.

Репин Виктор Степанович – доктор биологических наук, заведующий лабораторией экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: V.Repin@mail.ru

Для цитирования: Репин В.С. Модель расчета доз бета-облучения клеток трахеобронхиального отдела при движении точечного источника // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 3. С. 6-17. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-6-17

A model for calculating beta exposure doses to tracheobronchial cells during movement of a point source

Victor S. Repin

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

The article describes a model and method for calculating beta-exposure doses to secretory and basal cells of the tracheobronchial part of the respiratory tract when a point source of 1 Bq activity moves along the inner surface of respiratory formations. The calculations, that used for proposed model, were performed by using a ^{90}Y point source as an example. The dose calculation model takes into account the speed of movement of the radiation source in each respiratory formation, the size of the respiratory formations, and the depth of the secretory and basal cells. The dose calculation is based on the dose rate attenuation functions published by W.G. Cross et al. (DOI: 10.1097/00004032-199208000-00002). The calculations were performed for a cylindrical model of a respiratory formation. Two kinds of cells were considered for the dose estimation: cells irradiated without beta-particle exit into bronchial lumen (type 1 cells) and cells irradiated due to beta-particle exit into bronchial lumen (type 2 cells). The results of calculations showed, that as far as the generation number increasing, the average irradiation doses of the type 1 cells are 10 or more times greater than those of the type 2 cells. With increasing generation number in the tracheobronchial tree, doses per cells increase by several orders of magnitude. The highest doses are formed in bronchioles of generations 9-15, reaching units and tens of mGy. In spite of the fact that the number of generation increases, the total number of irradiated cells decreases, the collective doses of irradiated cells (sum of doses to all cells of the respiratory formation) in the last generations are 30-50 times higher than the doses of the first generations. Thus, in case of a single point source, there is a significant (by many orders of magnitude) scatter of doses to individual cells in individual respiratory formation, as well as significant differences in average doses of trachea, individual bronchi and bronchioles.

Key words: Chernobyl accident, respiratory tract, secretory cells, basal cells, hot particles, beta-radiation doses.

References

1. Chernobyl accident and its consequences: Information. Meeting of IAEA experts, Vienna, August 25 – 29, 1986. Moscow: GKAE USSR, 1986. 86 p. (In Russian).
2. Chernobyl Reactor Accident: Report of a Consultation 6 May 1986 (provisional). World Health Organization. ICP/CEH 129. Copenhagen; 1986. 37 p.
3. Information on the Chernobyl accident and its consequences, prepared for the IAEA. *Atomic Energy*. 1986;61(5): 301-320 (In Russian).
4. Izrael YuA, Petrov VN, Severov DA. Modeling of radioactive fallout in the near zone from the Chernobyl accident. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and hydrology*. 1987. N 7 (In Russian).
5. Asmolov VG, Borovoy AA, Demin VF, et al. The accident at the Chernobyl nuclear power plant: a year later. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 1988;64(1): 3-23 (In Russian).
6. Begichev SN, Borovoy AA, Burlakov EV, et al. Radioactive releases due to the chernobyl accident. Fission Product Transport Process in Reactor Accidents: International Seminar, Dubrovnik, 22 – 26 may 1989 y. Dubrovnik; 1989. 37 p.
7. Chernobyl: radioactive contamination of natural environments. Ed. by YuA. Izrael. Leningrad: Hydrometeoizdat; 1990. 296 p. (In Russian).
8. International Chernobyl Project. Assessment of Radiological Consequences and Protective Measures. Report of the International Advisory Committee. IAEA, Vienna; 1992. P. 83-929 (In Russian).
9. Borzilov VA, Klepikova NV. Effect of Meteorological Conditions and Release Compositions on Radionuclide Deposition After Chernobyl Accident. The Chernobyl Papers. V. 1. Doses to the Soviet Population and Early Health Effects Studies / Ed by SE. Merwin, MI. Balonov. *Research Enterprises*; 1993. P. 47-68.
10. International Chernobyl Project. Assessment of Radiological Consequences and Protective Measures. *Report of the International Advisory Committee*. IAEA, Vienna; 1992. 740 p. (In Russian).
11. Stannard JN. Radioactivity and health – a history. Ed. RW. Baalman. Siettle: Pathific Northwest Laboratory; 1988. P. 641-651.
12. Grinborg JE, Linborg L, Tilikidis A. Dosimetry around Hot Particles with microdosimetric Techniques. National Institute of Radiation Protection: Preprint. Stockholm; 1988. 21 p.
13. Melenevsky AE. "Hot" particles – products of Chernobyl accident and their oncogenic danger. Proceedings of Academy of Sciences of Ukraine. 1992;1: 138-143. (In Russian).
14. Burkart W. Dose and health implications from particulate radioactivity (hot particles) in the environment. Hot particles from Chernobyl fallout: Proceeding of an international workshop, Theuern, 28-29 Oct. 1987. Vienna.: IAEA; 1987. P. 121-130.
15. Hofmann W, Crawford-Brown DJ, Martonen TB. The radiological significance of beta emitting hot particles released

Victor S. Repin

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

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

- from Chernobyl nuclear power plant. *Radiation Protection Dosimetry*. 1988;22(3): 149-157.
16. Demchuk VV, Voytsekhovich OV, Kashparov VA, Viktorova NV, Laptev GV. Analysis of Chernobyl fuel Particles and their migration Characteristics in Water and Soil. Seminar on Comparative Assessment of Environmental Impact of Radionuclides Released during Three Major Nuclear Accidents: Kyshtym, Windscale, Chernobyl: Luxemburg, 1-5 October 1990. Luxemburg; 1991;1: 493-514.
 17. Falk R, Suomela J, Kerekes AA. Study of Hot Particles collected in Sweden one year after Chernobyl Accident. *Journal of Aerosol Science*. 1988. P. 1339-1342.
 18. Bondarenko OA, Los IP, Zelensky AV. Prevalence of hot particles on the territory of USSR after Chernobyl accident. Proceedings of I All-Union Radiobiol. Congress, Moscow, 21-27 Aug. 1989, Moscow: B.I., 1989. Vol. 2. 476 p. (In Russian).
 19. Likhtaryov IA, Repin VS, Bondarenko OA, Nechaev SYu. Radiological effects after inhalation of highly radioactive fuel particles produced by the Chernobyl accident. *Radiation Protection Dosimetry*. 59(4): 247-254.
 20. The International Commission on Radiological Protection. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP. 1994 24 (1-3).
 21. Charles MW, Mill AJ, Darley PJ. Carcinogenic risk of hot-particle exposures. *Journal of Radiological Protection*. 2003;23(1): 5-28.
 22. Charles MW, Harrison JD. Hot particle dosimetry and radiobiology-past and present. *Journal of Radiological Protection*. 2007;27(3a): 97-109.
 23. Guide for the Practical Application of the ICRP Human Respiratory Tract Model. ICRP Supporting Guidance 3. Ann. ICRP. 2002;32(1-2).
 24. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1. ICRP Publication 130. Ann. ICRP. 2015;44(2).
 25. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides – Part 1. ICRP Publication 56. Ann. ICRP. 1990. 20(2).
 26. Cross WG, Freedman NO, Wong PY. Beta-ray Dose Distributions from Point Sources in an Infinite Water Medium. *Health Physics*. 1992;63(2):160-171.
 27. James AC, Gehr P, Masse R, Cuddihy RG, Cross FT, Birchall A, et al. Dosimetry model for bronchial and extrathoracic tissues of the respiratory tract. *Radiation Protection Dosimetry*. 1991;37(4): 221-230.
 28. Birchall A, Bailey MR, James AC. LUDEP: A Lung Dose Evaluation Program. *Radiation Protection Dosimetry*. 1991;38(1-3): 167-174.
 29. Fedorovich GV. Model of pulmonary mucociliary clearance. *Pulmonology*. 2016;26(2): 222-230.

Received: August 04, 2021

For correspondence: Viktor S. Repin – Doctor of Biological Sciences, Head of Ecology Laboratory of Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: V.Repin@mail.ru)

For citation: Repin V.S. A model for calculating beta exposure doses to tracheobronchial cells during movement of a point source. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No. 3, P. 6-17. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-6-17

Оценка доз облучения лимфоцитов при пероральном поступлении радионуклидов различной тропности

Е.И. Толстых¹, М.О. Дегтева¹, А.В. Аклеев^{1,2}

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

²Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

Оценка доз на лимфоциты актуальна в свете решения ряда радиобиологических проблем, включая оценку риска различных гемобластозов (лейкоз, множественная миелома, лимфома и др.), а также использования циркулирующих Т-лимфоцитов в качестве «естественных биодозиметров». Последнее связано с тем, что частота хромосомных aberrаций, возникающих в лимфоцитах после лучевого воздействия, пропорциональна накопленной дозе. Оценка доз на циркулирующие лимфоциты требует учета двух факторов: во-первых, дозы, полученной предшественниками (прогениторами) лимфоцитов в красном костном мозге; а во-вторых, дозы, полученной лимфоцитами в лимфоидных органах при циркуляции. Модели, представленные в публикациях Международной комиссии по радиологической защите (ICRP-67, ICRP-100), дают возможность рассчитать дозу для конкретного лимфоидного органа при известном уровне поступления радионуклида. Недавно созданная модель облучения циркулирующих Т-лимфоцитов учитывает все слагаемые дозы и возрастные особенности динамики Т-лимфоцитов: 1) облучение предшественников Т-лимфоцитов в красном костном мозге; 2) облучение Т-лимфоцитов в каждом лимфоидном органе с учетом доли резидентных лимфоцитов, а также времени пребывания там лимфоцитов. Целью данного исследования является оценка дозовых коэффициентов, позволяющих перейти от перорального поступления ^{141,144}Ce, ⁹⁵Zr, ^{103,106}Ru, ⁹⁵Nb к накопленной дозе на циркулирующие Т-лимфоциты. Для расчетов использовались дозовые коэффициенты из публикаций Международной комиссии по радиологической защите для конкретных лимфоидных органов, а также опубликованные оценки времени, которое циркулирующие лимфоциты проводят в этих лимфоидных органах и тканях. В результате было показано, что дозы на циркулирующие Т-лимфоциты выше, чем дозы на красный костный мозг от этих радионуклидов, но ниже, чем дозы на стенку толстой кишки. Рассчитанные дозовые коэффициенты зависели от возраста; максимальные значения были характерны для новорожденных. Данные коэффициенты для ^{141,144}Ce, ⁹⁵Zr, ⁹⁵Nb и ^{103,106}Ru могут быть использованы для оценки доз на органы и ткани на основе данных о частоте хромосомных aberrаций в лимфоцитах периферической крови.

Ключевые слова: Т-лимфоциты, лимфоидные органы, дозовые коэффициенты, ^{141,144}Ce, ⁹⁵Zr, ⁹⁵Nb, ^{103,106}Ru, внутреннее облучение, биодозиметрия.

Введение

Оценка дозы на лимфоциты при облучении человека представляет интерес в свете решения как минимум двух актуальных радиобиологических задач. Первую задачу обозначили в своей работе Lee C. et al. [1], указывая, что «несмотря на десятилетия эпидемиологических исследований, нет ясности в вопросе, может ли ионизирующее излучение вызывать лимфомы». Ответ до сих пор не очевиден, поскольку в большинстве эпидемиологических исследований доза на красный костный мозг (ККМ) используется как суррогат дозы на лимфоциты [2–6]. При этом в случае неравномерного внутреннего облучения дозы на лимфоциты и ККМ могут существенно различаться. Вторая задача связана с использованием циркулирующих Т-лимфоцитов как «естественных биодозиметров»,

поскольку частота хромосомных aberrаций, возникающих в них после облучения, пропорциональна накопленной дозе [7]. Оцененную таким образом дозу часто интерпретируют как дозу на ККМ [7], что также вызывает вопросы в случае неравномерного внутреннего облучения [8]. Обе эти радиобиологические задачи актуальны для мониторинга здоровья работников ядерных предприятий, а также при обследовании населения территорий, загрязнённых в результате радиационных инцидентов. В частности, это актуально для эпидемиологических и дозиметрических исследований в Уральском регионе, где в 1950-е гг. произошло радиоактивное загрязнение пойменных земель и воды реки Течи, а также формирование в 1957 г. Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС). В окружающей среде тогда оказалась смесь

Толстых Евгения Игоревна

Уральский научно-практический центр радиационной медицины

Адрес для переписки: 454141, Россия, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: evgenia@urcrm.ru

радионуклидов, включая $^{89,90}\text{Sr}$, $^{144,146}\text{Ce}$, ^{95}Zr , $^{103,106}\text{Ru}$, ^{95}Nb , ^{137}Cs . Причиной радиоактивного загрязнения была производственная деятельность ПО «Маяк» (Челябинская область, Россия) и ряд аварийных ситуаций, случившихся в хранилищах радиоактивных отходов [9–11]. Основным источником облучения населения загрязненных территорий был $^{89,90}\text{Sr}$, поступающий в организм с водой и пищей. Поступая в организм, радиоизотопы Sr ввиду своей остеотропности практически локально облучают ККМ, очень мало воздействуя на другие лимфоидные ткани. Другие вышеперечисленные радионуклиды также приводят к неравномерному внутреннему облучению. Следует отметить, что ^{144}Ce оставлял значительную долю (около 66%) в выбросах в атмосферу радионуклидов в результате аварии 1957 г., приведшей к формированию ВУРСа [11].

В последние годы была проведена большая работа для выяснения роли облучения прогениторов Т-клеток в ККМ и облучения циркулирующих Т-лимфоцитов во внескелетных лимфоидных тканях при формировании хромосомных aberrаций [12]. На основе разработанной нами ранее концепции Т-клеточного рода [12, 13] был предложен модельный подход для оценки доз на циркулирующие Т-лимфоциты [14]. Этот подход позволяет рассчитывать дозы на Т-лимфоциты как средневзвешенное значение доз, формирующихся в ККМ при облучении Т-клеточных предшественников – прогениторов, а также в других лимфоидных тканях при миграции Т-лимфоцитов. Предварительные оценки доз и валидация модели были проведены для жителей прибрежных сел реки Течи, облучившихся, в основном, за счет $^{89,90}\text{Sr}$; их кровь исследовалась методом FISH для оценок частоты хромосомных aberrаций [14].

Помимо ККМ, преимущественному или локальному облучению может подвергаться кишечник, если рацион человека загрязнен радионуклидами с небольшим коэффициентом всасывания через кишечную стенку в кровь, такими как $^{141,144}\text{Ce}$, ^{95}Zr , $^{103,106}\text{Ru}$, ^{95}Nb . Небольшой коэффициент всасывания также имеют изотопы стронция. Расстояние, на которое распространяется радиационное воздействие этих радионуклидов, во многом определяется длиной пробега испущенных электронов, поэтому преимущественному облучению подвергаются стенки кишечника, содержащие стволовые эпителиальные клетки, а также лимфоидная ткань [15, 16]. Анализ последних опубликованных данных позволил определить возрастные особенности пребывания различных субпопуляций лимфоцитов в *lamina propria*, кишечном эпителии и лимфатических фолликулах [17]. Еще одним органом преимущественного накопления для некоторых радионуклидов является печень, которая также содержит значительное количество лимфоцитов. Например, по оценкам МКРЗ-67 [18], доза от ^{144}Ce на ткани печени в 50 раз выше, чем доза на селезенку и другие лимфоидные ткани (кроме ККМ и кишечника).

Цель исследования – используя разработанную нами модель облучения Т-лимфоцитов, оценить дозовые коэффициенты, позволяющие перейти от перорального поступления $^{141,144}\text{Ce}$, ^{95}Zr , $^{103,106}\text{Ru}$, ^{95}Nb к накопленной дозе на циркулирующие Т-лимфоциты.

Материалы и методы

Расчет дозовых коэффициентов (DK_L), позволяющих перейти от перорального поступления 1 Бк радионуклида к накопленной дозе на циркулирующие Т-лимфоциты, осуществляется с использованием модели облучения, которая была подробно описана ранее [13, 14]. В модели были отражены следующие особенности формирования пула циркулирующих Т-лимфоцитов:

1. Все Т-лимфоциты происходят от Т-клеточных предшественников – прогениторов, которые формируются в ККМ. Через кровеносное русло часть из них переходит в тимус, где происходит формирование Т-лимфоцитов с уникальными Т-клеточными рецепторами. Т-лимфоциты в периферических лимфоидных тканях образуют многоклеточные и часто долгоживущие клоны клеток с одинаковыми Т-клеточными рецепторами; репертуар Т-клонов формируется в детстве и остается довольно стабильным в течение жизни (до 70 лет) [19–24].

2. При облучении Т-прогенитора в ККМ потенциальный груз хромосомных aberrаций несут все его потомки, то есть целый набор Т-клонов с уникальными Т-клеточными рецепторами. Все потомки одного прогенитора и сам прогенитор объединяются в Т-клеточный род или Т-Genus (TG), который является объектом моделирования [13].

Принималось, что продукция TG прямо пропорциональна продукции тимусом Т-лимфоцитов и потеря TG в течение жизни не оказывает существенное влияние на возрастное соотношение представителей различных TG в периферической крови. В свою очередь, для оценки зависящей от возраста продукции тимусом Т-лимфоцитов использовали результаты моделирования Bains I. [25, 26], которые базируются на экспериментальных данных по скорости пролиферации различных фракций Т-лимфоцитов, их количества в периферической крови, возрастной динамике и т.п. Как было показано [25], от рождения до 1 года продукция тимусом Т-лимфоцитов увеличивается, достигая максимума к 1 году; от 1 года до 8 лет падение продукции тимуса идет со скоростью 12% в год; от 8 до 20 лет падение продукции идет со скоростью 4% в год; от 20 до 70 лет снижение продукции тимуса идет со скоростью 8% в год.

Средневзвешенный DK_L рассчитывается как сумма двух дозовых коэффициентов, которые представляют собой: 1) DK_{LP} – средневзвешенная доза облучения Т-лимфоцитов (Гр), накопленная в период пребывания прогениторов Т-клеток в ККМ при поступлении 1 Бк радионуклида R; 2) DK_{LC} – средневзвешенная доза на циркулирующие лимфоциты (Гр), которая представляет собой дозу, накопленную Т-лимфоцитами в период их циркуляции в организме человека после единичного поступления радионуклида R.

DK_{LP} представляет собой дозу, накопленную прежде, чем прогениторы (предшественники) покинули ККМ и начали генерировать клоны Т-лимфоцитов в тимусе. Она рассчитывается как среднее значение, взвешенное в соответствии с долей потомков каждого предшественника в периферической крови на момент забора крови:

$$DK_{LP} = \frac{1}{P_{TG}(age_s)} \int_{t_1}^{t_s} p_{TG}(age) D_{KKM}(t, age) dt; (1)$$

где t_1 – первый год накопления дозы от момента острого поступления 1 Бк радионуклида с рационом;

t_s – год, на который рассчитывается накопленная доза age = возраст человека (годы), который варьирует от age_i (возраст поступления радионуклида R) до возраста, на который считается накопленная доза age_s .

$P_{TG}(age)$ – общее число Т-клеточных родов, произведенных в период от рождения до указанного возраста (в относительных единицах), определяется как интеграл функции $f_{TG}(age)$:

$$P_{TG}(age) = \int_0^{age} f_{TG}(t) dt; \quad (2)$$

$$f_{TG}(age) = \begin{cases} 0,5 + 0,5 \cdot age, & 0 \leq age \leq 1 \\ \exp(-0,12 \cdot (age - 1)), & 1 < age \leq 8 \\ 0,4317 \cdot \exp(-0,04 \cdot (age - 8)), & 8 < age \leq 20 \\ 0,2671 \cdot \exp(-0,08 \cdot (age - 20)), & 20 < age \end{cases} \quad (3)$$

$P_{TG}(age)$ – число Т-клеточных родов (TG), произведенных за один год (в относительных единицах), рассчитывается интегрированием функции (3) для заданного возраста age :

$$p_{TG}(age) = \int_{age}^{age+1} f_{TG}(t) dt. \quad (4)$$

$D_{KKM}(t, age)$ – поглощенная доза на ККМ от поступления 1 Бк радионуклида R , накопленная к возрасту age

DK_{LC} представляет собой дозу, накопленную лимфоцитами в период их циркуляции в организме человека при поступлении 1 Бк радионуклида R . Во время циркуляции лимфоциты проводят определенные доли времени $K_{org,i}(age)$ в лимфоидных органах/тканях. DK_{LC} рассчитывается как среднее значение, взвешенное в соответствии с долей лимфоцитов, которые включены в режим циркуляции в каждом возрасте; а также долей времени, проводимого циркулирующими лимфоцитами в i лимфоидных органах $K_{org,i}(age)$:

$$DK_{LC} = \frac{1}{P_{TG}(age_s)} \int_{t_1}^{t_s} P_{TG}(age) [K_{org,1} \dot{D}_{org,1}(t, age) + \dots + K_{org,i} \dot{D}_{org,i}(t, age)] dt, \quad (5)$$

где $P_{TG}(age)$ – количество Т-клеточных родов, произведенных в течение периода от рождения до age и переключившихся в режим циркуляции (рассчитывается согласно (2) в относительных единицах);

$\dot{D}_{org,i}(t, age)$ – годовая мощность поглощенной дозы в i -м лимфоидном органе org , которая является функцией

времени и возраста на момент поступления радионуклида R .

Полная средневзвешенная лимфоцитарная доза D_L рассчитывается как сумма (1) и (5):

$$DK_L = DK_{LP} + DK_{LC} \quad (6)$$

Численные значения $p_{TG}(age)$ и $P_{TG}(age)$ были представлены в МР17.24 09-20¹.

$K_{org}(age)$ рассчитывались на основе данных литературы по распределению лимфоцитов в различных органах и тканях [27–29], а также информации по соотношению в них различных субпопуляций Т-лимфоцитов [30–32], включая оценки доли циркулирующих лимфоцитов, способных к миграции, и резидентных (нециркулирующих) лимфоцитов [32, 33]. Распределение лимфоцитов по тканям кишечника и вклад различных субпопуляций в общее число Т-лимфоцитов было подробно рассмотрено в обзоре [17]. Общее число лимфоцитов в теле взрослого человека составляет примерно $4,9 \times 10^{11}$ клеток [28, 29].

$\dot{D}_{KKM}$ и $\dot{D}_{org}$ были рассчитаны ранее на основе биокинетических и дозиметрических моделей Международной комиссии по радиологической защите с использованием программы PLEIADES [34] и применялись для расчета доз на жителей прибрежных сел реки Теча [35].

Дозовые коэффициенты DK_L рассчитывались для референтных возрастов на момент поступления радионуклидов, age_i : 0, 1, 5, 10, 15, 25 лет (влияние пола не учитывалось). Для каждого возраста и каждого радионуклида рассчитывали значение DK_L как дозу, накопленную за первые 10 лет после поступления 1 Бк радионуклида. Дальнейшее приращение дозы не является существенным, поскольку период полураспада рассматриваемых радионуклидов варьирует от 32,4 дней (^{141}Ce) до 368 дней (^{106}Ru); небольшое последующее приращение дозы (около 3% за 60 лет) происходит за счет выхода облучившихся Т-прогениторов из ККМ и формирования новых Т-лимфоцитов в тимусе, продукция которых резко снижается с возрастом.

Результаты и обсуждение

В таблице 1 приведены результаты оценок распределения лимфоцитов и их различных субпопуляций у взрослых и детей, а также оцененные нами значения K_{org} , отражающие долю времени, которое циркулирующие лимфоциты проводят в конкретных органах/тканях. При оценках предполагалось, что общее распределение лимфоцитов в теле существенно не меняется с возрастом, однако учитывалось, что в первые годы жизни происходит резкое изменение доли циркулирующих Т-лимфоцитов в органах и тканях. Эти изменения связаны, в частности, с формированием в детском возрасте местного иммунитета в слизистых оболочках, где задействованы резидентные Т-лимфоциты [15].

¹ МР 17.24 09-20. Оценка дозы облучения Т-лимфоцитов и их предшественников при внутреннем облучении стронцием-90, ФМБА РФ Утверждены 17.03.2020 г. С. 24. [Methodical guidelines 17.24 09-20. Assessment of the radiation dose for T-lymphocytes and their precursors during internal irradiation with strontium-90. FMBA RF Approved on 03.17. 24 p. (In Russ.)]

Таблица 1

Распределение в теле лимфоцитов, Т-лимфоцитов и циркулирующих Т-лимфоцитов на основе опубликованных данных [27, 28, 30, 31, 33]

[Table 1]

Body distribution of lymphocytes, T lymphocytes and circulating T lymphocytes based on published data

Орган/ткань [Organ/ tissue] (org)	% от общего числа лимфоцитов [% of total num- ber of lymph.]	Доля Т-клеток среди лимфоцитов в органе [The proportion of T cells among lymph. in the organ] ^a	Взрослые, подростки [Adults, teenagers]		Дети 0–2 года [Children 0–2 years]	
			Доля циркули- рующих Т-клеток [Proportion of circulat- ing T cells] ^b	K_{org}^b	Доля циркули- рующих Т-клеток [Proportion of cir- culating T cells] ^a	K_{org}^b
Кровь [Blood]	2,0	0,90	1,0	0,04	1,0	0,03
Лимфоузлы [Lymph nodes]	39	0,76	0,80	0,55	0,95	0,48
Селезенка [Spleen]	14	0,44	0,55	0,08	0,9	0,10
Слизистая кишечника [Intestinal mucosa]	10					
Тонкий кишечник ^г [Small intestine]	5,3	0,6	0,29	0,022	0,53	0,03
Толстый кишечник ^г [Large intestine]	4,9	0,6	0,36	0,025	0,79	0,04
Тимус [Thymus]	10	0,97	0,10	0,02	0,5	0,09
Костный мозг [Bone marrow]	10	0,50	0,80	0,10	1,0	0,09
Слизистая легких [Lung mucosa]	6,1	0,50	0,43	0,031	0,8	0,04
Печень [Liver]	2,0	0,63	0,55	0,017	0,9	0,02
Другие ткани [Other tissues]	6,1	0,99	0,80	0,1	0,8	0,08
Всего [Total]	100			1		1

а – базируется на оценках [28] отношения Т: В лимфоцитов с учетом естественных киллеров NK; для печени на основе [36] [based on estimates [28] of the ratio of T: B lymphocytes taking into account natural killers NK; for liver based on [36]];

б – значение относительно общего числа Т-лимфоцитов в органе; для печени взято значение, как для селезенки [the value relative to the total number of T-lymphocytes in the organ; the meaning for the liver is taken as for the spleen];

в – относительный вклад циркулирующих Т-лимфоцитов данного органа в общий пул циркулирующих Т-лимфоцитов тела [the relative contribution of circulating T-lymphocytes of a given organ to the total pool of circulating T-lymphocytes of the body];

г - включает lamina propria и фолликулы, в том числе Пейеровы бляшки [includes lamina propria and follicles, as well as Peyer's patches].

В таблице 2 для примера приведены значения максимальной годовой мощности дозы (дозы, накопленной за 1-й год после поступления 1 Бк радионуклида, $\dot{D}_{org}$) для интересующих органов и тканей для двух возрастных групп: новорожденные и взрослые, рассчитанные по моделям МКРЗ-67. Согласно таблице 2, максимальная мощность дозы значительно выше у новорожденных, чем у взрослых, что характерно для всех радионуклидов и лимфоидных тканей. Как у взрослых, так и у детей, мощности доз в кишечнике существенно превышают значения для других лимфоидных органов. Это связано с низкими коэффициентами всасывания радионуклидов из кишечника в кровь (f_i) (см. табл. 2). При невысоких значениях f_i загрязненный пищевой комок проходит, в основном, транзитом через кишечник, облучая его стенки. Для всех радионуклидов f_i существенно выше у новорожденных, чем у взрослых. Следует отметить, что для обсуждаемых радионуклидов значение f_i для лиц в возрасте 1, 5, 10, 15 лет в моделях МКРЗ принимается равным таковому для взрослых. При попадании радионуклидов в кровь местом их депонирования могут быть также ККМ и печень, что

приводит к более высоким дозам облучения этих органов по сравнению с другими лимфоидными тканями.

В таблице 3 представлены рассчитанные нами значения D_{K_L} для циркулирующих Т-лимфоцитов в зависимости от возраста. Как следует из таблицы 3, возрастные изменения D_{K_L} близки для всех радионуклидов: максимальные значения ожидаемо наблюдаются у новорожденных, для которых также характерны максимальные дозовые коэффициенты для ККМ и кишечника. После резкого спада к возрасту 1 год (более чем в 10 раз) D_{K_L} повышаются к возрасту 5 лет на 15–20% (кроме ^{95}Zr), что может быть связано с перераспределением циркулирующих лимфоцитов в организме (см. табл. 1). Далее в возрасте от 10 до 25 лет D_{K_L} снижаются примерно в 1,5 раза. Среди рассмотренных радионуклидов более высокие значения D_{K_L} наблюдаются у ^{106}Ru , что связано с наибольшим среди рассмотренных радионуклидов периодом его полураспада и относительно высоким коэффициентом всасывания f_i . Представленные дозовые коэффициенты позволяют рассчитывать дозу на циркулирующие Т-лимфоциты при известной динамике поступления радионуклидов.

Таблица 2

Значения $\dot{D}_{org}$ (Гр/год $\times 10^{-10}$) за 1-й год после поступления 1 Бк радионуклида для новорожденных ($age_i=0$) и взрослых ($age_i=25$)

[Table 2]

$\dot{D}_{org}$ values (Gy/year $\times 10^{-10}$) for the 1st year following 1 Bq radionuclide intake for newborns ($age_i = 0$) and adults ($age_i=25$)

Орган/ткань [org]	¹⁴¹ Ce $t_{1/2}=32,41$ д		¹⁴⁴ Ce $t_{1/2}=284,2$ д		⁹⁵ Zr $t_{1/2}=63,99$ д		⁹⁵ Nb $t_{1/2}=35,15$ д		¹⁰³ Ru $t_{1/2}=39,26$ д		¹⁰⁶ Ru $t_{1/2}=368$ д	
	0	25	0	25	0	25	0	25	0	25	0	25
Кровь [Blood]*	0,66	0,102	6,46	0,136	6,76	1,29	5,11	1,0	12,0	1,16	182	10,1
Лимфоузлы [Lymph nodes]*	0,66	0,102	6,46	0,136	6,76	1,29	5,11	1,0	12,0	1,16	182	10,1
Селезенка [Spleen]	0,806	0,087	6,52	0,123	7,98	1,09	6,81	0,89	13,6	1,15	183	10,2
Тонкий кишечник [Small intestine]	9,7	1,47	111	13,0	37,4	7,35	33,4	6,67	31,6	5,00	297	25,8
Толстый кишечник [Large intestine]	14,0	2,94	267	55,0	73,7	15,9	70,1	15,0	53,8	10,5	476	75,5
Тимус [Thymus]	0,3	0,0066	6,16	0,0761	3,09	0,425	1,97	0,195	10,6	0,689	181	9,92
Костный мозг [Bone marrow]	1,06	0,189	323	1,22	41,2	4,63	10,8	1,81	11,6	1,59	181	10,3
Слизистая легких [Lung mucosa]	0,41	0,0142	6,29	0,0835	4,58	0,585	3,19	0,302	10,8	0,715	181	9,92
Печень [Liver]	0,331	0,233	86,3	5,93	7,74	1,03	11,3	1,39	13,8	1,10	183	10,1
Прочие ткани [Other tissues]*	0,66	0,102	6,46	0,136	6,76	1,29	5,11	1,0	12,0	1,16	182	10,1
f_i	0,005	0,0005	0,005	0,0005	0,02	0,01	0,02	0,01	0,1	0,05	0,1	0,05

* приведены значения мощности дозы на другие ткани (remainder, согласно терминологии МКРЗ-67) [the values of the dose rate to other tissues (remainder, according to ICRP-67 terminology) are given]

f_i – коэффициент всасывания радионуклида из кишечника в кровь [coefficient of intestinal absorption of a radionuclide into the blood].

Таблица 3

Значения DC_L для циркулирующих Т-лимфоцитов в зависимости от возраста для ^{141,144}Ce, ⁹⁵Zr, ^{103,106}Ru, ⁹⁵Nb, Гр/Бк $\times 10^{-10}$

[Table 3]

DC_L values for circulating T-lymphocytes depending on age for ^{141,144}Ce, ⁹⁵Zr, ^{103,106}Ru, ⁹⁵Nb, Gy/Bq $\times 10^{-10}$

Возраст [Age]	¹⁴¹ Ce	¹⁴⁴ Ce	⁹⁵ Zr	⁹⁵ Nb	¹⁰³ Ru	¹⁰⁶ Ru
0	11,0	428	43,5	12,3	13,8	269,4
1	1,07	23,7	20,1	6,88	7,10	106,7
5	1,64	28,5	14,5	9,66	8,10	82,2
10	1,26	20,3	9,81	7,33	5,90	54,8
15	0,87	13,3	6,63	5,17	4,10	34,9
25	0,83	13,7	5,74	4,77	3,80	32,5

Лимфоциты являются сложной гетерогенной популяцией клеток, поведение которых в организме сейчас интенсивно изучается. Проблемной является количественная оценка распределения лимфоцитов в теле человека. В нашей работе мы использовали данные, которые применяются при моделировании иммунной системы (см.

табл. 1). Эти данные отличаются от значений, принятых Международной комиссией по радиологической защите [37, 38], которые базируются, в основном, на теоретических исследованиях Osgood E. [39], выполненных в 1954 г. Мы согласны с суждением Trepel F. [27]², что оценки Osgood E. [39] являются не вполне реалистичными, по-

² Trepel 1974, p. 515: «...До сих пор был предпринят только один подход для оценки количества и распределения лимфоцитов у человека. Это было сделано Осгудом (Osgood, 1954) теоретически впечатляющим, но чисто умозрительным способом, предполагающим вдвое завышенный объем лимфоцитов, четырехкратное завышенное количество клеток костного мозга и фантастическое соотношение лимфоцитов в лимфоидных органах к лимфоцитам в экстралимфоидных тканях 1: 10. Эта сумма ошибок привела к чрезвычайно высокой оценке 6×10^{12} лимфоцитов у человека (более чем десятикратное завышение нашей оценки), при этом 85% всех лимфоцитов оказывались диффузно распределенными в экстралимфоидных тканях, что в сумме составляло чистую массу лимфоцитов 1500 г...» [27] [Trepel 1974, p. 515: "...Thus far, only one approach has been undertaken to estimate lymphocyte number and distribution in man.

этому использовали в своих расчетах более поздние данные, представленные в таблице 1.

Применяя модельный подход, мы впервые рассчитали дозовые коэффициенты $ДК_L$ для радионуклидов, которые могут загрязнять окружающую среду при аварийных ситуациях на предприятиях ядерного цикла и при попадании в организм приводят к неравномерному внутреннему облучению человека. Основное преимущество нашей модели в том, что учитывается облучение Т-клеточных прогениторов в ККМ, а не только дозы на лимфоциты, полученные во время их пребывания в лимфоидных органах при циркуляции. Следует отметить, что модель опирается на средние значения продукции тимуса в разном возрасте и параметров циркуляции Т-лимфоцитов, которые могут быть пересмотрены после накопления новых науч-

ных данных. Кроме того, как было показано в обзоре [17], для ряда параметров характерна большая индивидуальная вариабельность. Таким образом, представленные оценки $ДК_L$ следует рассматривать как приблизительные. Однако они позволяют оценить различия в дозах, накопленных в ККМ, слизистой кишечника и в циркулирующих Т-лимфоцитах. Для примера на рисунке представлено сопоставление накопленных доз в ККМ, толстом кишечнике (стенка) и циркулирующих лимфоцитах после единичного поступления радионуклида. Сопоставление сделано для новорожденных, пятилетних детей и взрослых (25 лет) на момент поступления радионуклида.

Как следует из анализа рисунка, накопленная доза на Т-лимфоциты всегда оказывалась выше, чем доза на ККМ (за исключением доз от ^{144}Ce у новорожденных), но ниже,

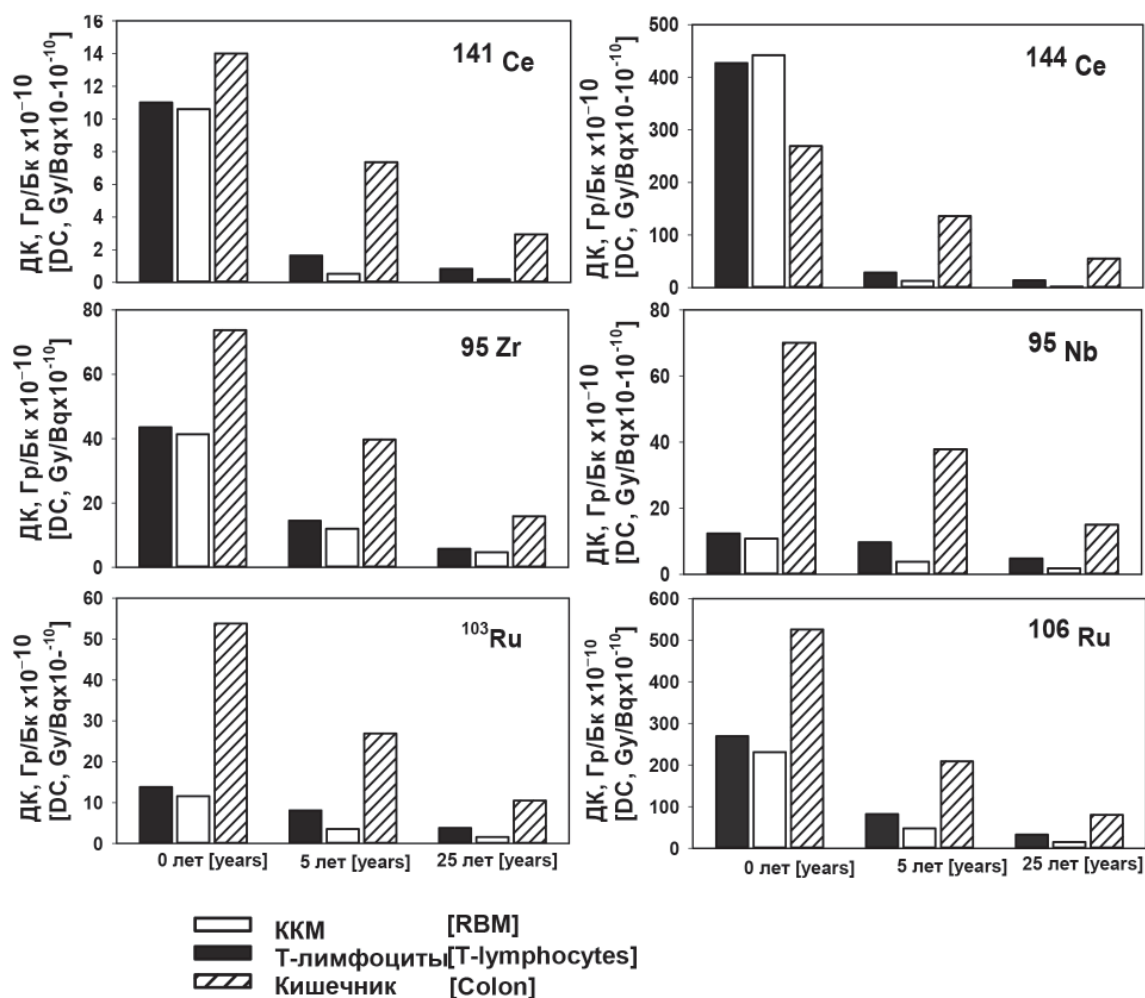


Рис. Сопоставление ДК (накопленных за 10 лет доз) после перорального поступления радионуклида для новорожденных (0 лет), пятилетних детей (5 лет) и взрослых (25 лет). Показаны ДК для циркулирующих Т-лимфоцитов (темный фон), красного костного мозга (ККМ – белый фон) и толстого кишечника (заштрихованный фон)

[Fig. Comparison of DCs (accumulated doses) after ingestion of a radionuclide for newborns (0 years), five-year-old children (5 years) and adults (25 years). DCs are shown for circulating T-lymphocytes (dark background), red bone marrow (RBM – white background), and large intestine (shaded background)]

This was done by Osgood (1954) in a theoretically impressive but purely speculative way, assuming a doubly overestimated lymphocyte volume, a fourfold overestimated number of bone marrow cells and a phantastic ratio of the lymphocytes in the lymphoid organs to the lymphocytes in the extralymphoid tissues of 1 : 10. This summation of errors led to an extremely high estimate of 6×10^{12} lymphocytes in man (more than the tenfold value of our estimate) with 85% of all lymphocytes being diffusely distributed in the extralymphoid tissues representing in total a pure lymphocyte mass of 1500 g... [27].

чем доза на толстый кишечник. Полученные результаты позволяют использовать дозу на Т-лимфоциты (которую определяют с использованием цитогенетических методов, таких как FISH) для оценки доз на ККМ и кишечник от $^{141,144}\text{Ce}$, ^{95}Zr , ^{95}Nb и $^{103,106}\text{Ru}$ с соответствующей поправкой на разницу в дозовых коэффициентах. Так, для ребенка 5 лет доза от ^{144}Ce на ККМ составит 0,44 от дозы на Т-лимфоциты (определенной на основе FISH), а соответствующая доза от ^{106}Ru – 0,58 от дозы на Т-лимфоциты.

Предложенный нами метод также позволяет оценивать дозы на Т-лимфоциты, находящиеся в пробе слизистой кишечника на момент ее забора. Такие пробы могут использоваться для изучения влияния ионизирующих излучений на местный иммунитет и микробиом кишечника. В этом случае оценивается средневзвешенная доза с учетом доли резидентных и циркулирующих Т-лимфоцитов, при этом доза на резидентные Т-лимфоциты будет соответствовать дозе на слизистую кишечника (кишечную стенку). Для примера мы оценили дозу на лимфоциты слизистой толстого кишечника взрослого человека от ^{144}Ce и получили значение $40,1 \cdot 10^{-10}$ Гр/Бк, что ниже дозы на саму слизистую ($55 \cdot 10^{-10}$ Гр/Бк), но существенно выше дозы на циркулирующие Т-лимфоциты ($13,7 \cdot 10^{-10}$ Гр/Бк).

В дальнейшем мы планируем оценить дозы на циркулирующие Т-лимфоциты для $^{89,90}\text{Sr}$ с использованием новой дозиметрической модели для этих радионуклидов [40], а также разработать модель облучения В-лимфоцитов, чтобы иметь возможность оценивать дозу на весь пул лимфоцитов для более точной оценки радиогенного риска различных типов гемобластозов (лейкозы, множественная миелома, лимфомы и др.) у членов Уральских когорт. Следует также отметить, что происходит усовершенствование моделей МКРЗ для различных лимфоидных органов: в частности, пересматриваются коэффициенты всасывания f_1 . Например, согласно [41], для Zr этот коэффициент снижается на порядок по сравнению со значениями, заложенными в модели МКРЗ-67.

Выводы

1. Впервые были определены дозовые коэффициенты, позволяющие перейти от перорального поступления $^{141,144}\text{Ce}$, ^{95}Zr , ^{95}Nb и $^{103,106}\text{Ru}$ к дозе на циркулирующие Т-лимфоциты; перечисленные радионуклиды могут вносить существенный вклад в аварийное радиоактивное загрязнение и приводят к неравномерному внутреннему облучению человека.

2. Дозы на циркулирующие Т-лимфоциты оказываются выше, чем дозы на ККМ от этих радионуклидов, но ниже, чем дозы на толстый кишечник. Эти дозы впервые учитывают облучение Т-прогениторов в ККМ.

3. Полученные дозовые коэффициенты могут быть использованы для оценок доз на органы и ткани от $^{141,144}\text{Ce}$, ^{95}Zr , ^{95}Nb и $^{103,106}\text{Ru}$ на основе данных о частоте хромосомных aberrаций в лимфоцитах периферической крови.

Литература

- Lee C., Morton L.M., Berrington de González A. A novel method to estimate lymphocyte dose and application to pediatric and young adult CT patient in the United Kingdom // *Radiation Protection Dosimetry*. 2018. Vol. 178, No 1. P. 116–21. doi: 10.1093/rpd/ncx084.
- Boice J.D.Jr. Second cancers following radiation treatment for cervical cancer. An international collaboration among cancer registries // *Journal of the National Cancer Institute*. 1985. Vol. 74, No 5. P. 955–75.
- Davis F.G., Boice J.D., Hrubec Z., Monson R.R. Cancer mortality in a radiation-exposed cohort of Massachusetts tuberculosis patients // *Cancer Research*. 1989. Vol. 49, No 21. P. 6130–6136.
- Boice J.D., Morin M.M., Glass A.G., et al. Diagnostic X-ray procedures and risk of leukemia, lymphoma, and multiple myeloma // *Journal of the American Medical Association*. 1991. Vol. 265, No 10. P. 1290–1294. doi:10.1001/jama.1991.03460100092031.
- Leuraud K., Richardson D.B., Cardis E., et al. Ionising radiation and risk of death from leukaemia and lymphoma in radiation-monitored workers (INWORKS): an international cohort study // *The Lancet Haematology*. 2015. Vol. 2, No 7. P. e276–e281. [http://dx.doi.org/10.1016/S2352-3026\(15\)00094-0](http://dx.doi.org/10.1016/S2352-3026(15)00094-0)
- Hsu W.L., Preston D.L., Soda M., et al. The incidence of leukemia, lymphoma and multiple myeloma among atomic bomb survivors: 1950–2001 // *Radiation Research*. 2013. Vol. 179, No 3. P. 361–82. doi: 10.1667/RR2892.1.
- IAEA Cytogenetic Analysis for Radiation Dose Assessment: a Manual Technical Reports, Series 405. 2001. URL: <http://www.pub.iaea.org/books/IAEABooks/6303/Cytogenetic-Analysis-for-Radiation-Dose-Assessment-A-Manual>. [Дата обращения: 23.07.2021].
- Giussani A., Lopez M.A., Romm H., et al. Eurados review of retrospective dosimetry techniques for internal exposures to ionising radiation and their applications // *Radiation and Environmental Biophysics*. 2020. Vol. 59, No 3. P. 357–387. doi: 10.1007/s00411-020-00845-y.
- Дегтева М.О., Шагина Н.Б., Воробьева М.И., и др. Современное представление о радиоактивном загрязнении реки Теча в 1949–1956 гг. // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2016. Т. 56, № 5. С. 523–534. DOI: 10.7868/S0869803116050039.
- Дегтева М.О., Толстых Е.И., Суслова Г.К., и др. Анализ результатов мониторинга содержания долгоживущих радионуклидов в организме жителей Уральского региона. *Радиационная гигиена*. 2018. Т. 11, № 3. С. 30–39. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-3-30-39>.
- Tolstikh E.I., Peremyslova L.M., Degteva M.O., et al. Reconstruction of radionuclide intakes for residents of East Urals Radioactive Trace (1957–2011) // *Radiation and Environmental Biophysics*. 2017. Vol. 56. P. 27–45. <https://doi.org/10.1007/s00411-016-0677-y>.
- Толстых Е.И., Возилова А.В., Дегтева М.О., и др. Концепция Т-клеточного рода как основа для анализа результатов цитогенетических исследований при локальном облучении костного мозга // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2020. Т. 60, № 1. С. 12–25. DOI: 10.31857/S0869803120010142.
- Tolstikh E.I., Degteva M.O., Vozilova A.V., et al. Local bone-marrow exposure: how to interpret the data on stable chromosome aberrations in circulating lymphocytes? (some comments on the use of FISH method for dose reconstruction for Techa riverside Residents) // *Radiation and Environmental Biophysics*. 2017. Vol. 56, No 4. P. 389–403. doi: 10.1007/s00411-017-0712-7.
- Tolstikh E.I., Degteva M.O., Vozilova A.V., et al. Interpretation of FISH results in the case of nonuniform internal radiation exposure of human body with the use of model approach // *Russian Journal of Genetics*. 2019. Vol. 55, No 10. P. 1227–1233. <https://doi.org/10.1134/S1022795419100132>.
- Ma H., Tao W., Zhu S. T lymphocytes in the intestinal mucosa: defense and tolerance // *Cellular & Molecular Immunology*. 2019. Vol. 16, No 3. P. 216–224. doi: 10.1038/s41423-019-0208-2.

16. Agace W.T-cell recruitment to the intestinal mucosa // Trends Immunology. 2008. Vol. 29, No 11. P. 514-22. doi: 10.1016/j.it.2008.08.003.
17. Толстых Е.И., Возилова А.В., Дёгтева М.О., Аклеев А.В. Подходы к цитогенетической оценке дозы при радиационном воздействии на лимфоидную ткань кишечника // Радиационная биология. Радиоэкология. 2021. Т. 61. № 4. С. 339–352.
18. ICRP. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides – Part 2 Ingestion Dose Coefficients. ICRP Publication 67. Ann. ICRP 23 (3-4), 1993.
19. Britanova O.V., Shugay M., Merzlyak E.M., et al., Dynamics of individual T cell repertoires: from cord blood to centenarians // The Journal of Immunology. 2016. Vol. 196, No 12. P. 5005–5013. doi 10.4049/jimmunol.1600005.
20. Naumova E.N., Gorski J., Naumo Y.N. Simulation studies for a multistage dynamic process of immune memory response to influenza: experiment in silico // Annales Zoologici Fennici. 2008. Vol. 45. P. 369–384. DOI: 10.5735/086.045.0502.
21. Yoshida K., Cologne J.B., Cordova K., et al. Aging-related changes in human T-cell repertoire over 20 years delineated by deep sequencing of peripheral T-cell receptors // Experimental Gerontology. 2017. Vol. 1, No 96. P. 29–37. doi 10.1016/j.exger.2017.05.015.
22. Britanova O.V., Putintseva E.V., Shugay M., et al. Age-related decrease in TCR repertoire diversity measured with deep and normalized sequence profiling // The Journal of Immunology. 2014. Vol. 192, No 6. P. 2689–2698. doi 10.4049/jimmunol.1302064.
23. Attaf M., Huseby E., Sewell A.K. $\alpha\beta$ T cell receptors as predictors of health and disease // Cellular & Molecular Immunology. 2015. Vol. 12, No 4. P. 391–399. doi 10.1038/cmi.2014.134.
24. Izraelson M., Kasatskaya S., Pogorelyi M., et al. Analysis of individual repertoires of T cell receptors // Immunologiya. 2016. Vol. 37, No 6. P. 347–352. DOI:10.18821/0206-4952-2016-37-6-347-352.
25. Bains I. Mathematical Modelling of T Cell Homeostasis. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy of the University College London, 2010. URL: <http://discovery.ucl.ac.uk/20159/1/20159.pdf> [Дата обращения: 23.07.2021].
26. Bains I., Yates A.J., Callard R.E. Heterogeneity in thymic emigrants: implications for thymectomy and immunosenescence // PLoS One. 2013. Vol. 8, No 2. P. e49554. doi 10.1371/journal.pone.0049554.
27. Trepel F. Number and distribution of lymphocytes in man. A critical analysis // Klinische Wochenschrift. 1974. Vol 52, No 11. P. 511-5. doi: 10.1007/BF01468720.
28. Westermann J., Pabst R. Distribution of lymphocyte subsets and natural killer cells in the human body // Journal of Clinical Investigation. 1992. Vol. 70, No 7. P. 539-44. doi: 10.1007/BF00184787.
29. Blum K.S., Pabst R. Lymphocyte numbers and subsets in the human blood. Do they mirror the situation in all organs? // Immunology Letters. 2007. Vol. 108, No 1. P.45-51. doi: 10.1016/j.imlet.2006.10.009.
30. Farber D.L., Yudanin N.A., Restifo N.P. Human memory T cells: generation, compartmentalization and homeostasis // Nature Reviews Immunology. 2014. Vol. 14, No 1. P. 24-35. doi: 10.1038/nri3567.
31. Kumar B.V., Connors T.J., Farber D.L. Human T Cell Development, Localization, and Function throughout Life // Immunity. 2018. Vol. 48, No. 2. P. 202-213. doi: 10.1016/j.immuni.2018.01.007.
32. Senda T., Dogra P., Granot T., et al. Microanatomical dissection of human intestinal T-cell immunity reveals site-specific changes in gut-associated lymphoid tissues over life // Mucosal immunology. 2019. Vol. 12, No 2. P. 378-389. doi: 10.1038/s41385-018-0110-8.
33. Thome J.J., Bickham K.L., Ohmura Y., et al. Early-life compartmentalization of human T cell differentiation and regulatory function in mucosal and lymphoid tissues // Nature Medicine. 2016. Vol. 22, No 1. P. 72-77. doi: 10.1038/nm.4008.
34. Fell T.P., Phipps A.W., Smith T.J. The internal dosimetry code PLEIADES // Radiation Protection Dosimetry. 2007. Vol. 124, No 4. P. 327-38. doi: 10.1093/rpd/ncm228.
35. 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 Physics. 2019. Vol. 117, No 4. P. 378-387. doi 10.1097/HP.0000000000001067.
36. Racanelli V., Rehmann B. The liver as an immunological organ // Hepatology. 2006. Vol. 43, No 2. Suppl. 1. P. S54-62. doi: 10.1002/hep.21060. PMID: 16447271.
37. ICRP. Report of the Task Group on Reference Man. ICRP Publication 23. Pergamon Press; Oxford, 1975.
38. ICRP. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values. A report of age- and gender-related differences in the anatomical and physiological characteristics of reference individuals, Publication 89 Ann ICRP. 2002. 32(3-4).
39. Osgood E.E. Number and distribution of human hemic cells // Blood. 1954. Vol. 9. P. 1141-1154. <https://doi.org/10.1182/blood.V9.12.1141.1141>.
40. Дёгтева М.О., Шишкина Е.А., Толстых Е.И., и др. Методологический подход к разработке дозиметрических моделей скелета человека для бета-излучающих радионуклидов // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2. С. 66-75. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-2-66-75>.
41. ICRP. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 2. ICRP Publication 134. Ann. ICRP 45(3/4), 2016.

Поступила: 23.07.2021 г.

Толстых Евгения Игоревна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник биофизической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины ФМБА России. **Адрес для переписки:** 454141, Россия, Челябинск, ул. Воровского, д. 68-А; E-mail: evgenia@urcrm.ru

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

Аклеев Александр Васильевич – доктор медицинских наук, профессор, директор Уральского научно-практического центра радиационной медицины ФМБА России, заведующий кафедрой радиационной биологии, Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

Для цитирования: Толстых Е.И., Дегтева М.О., Аклеев А.В. Оценка доз облучения лимфоцитов при пероральном поступлении радионуклидов различной тропности // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 3. С. 18-28. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-18-28

Estimation of lymphocyte radiation doses after the ingestion of radionuclides of different tropicity

Evgenia I. Tolstykh¹, Marina O. Degteva¹, Alexander V. Akleyev^{1,2}

¹Urals Research Center for Radiation Medicine of Federal Medical Biological Agency, Chelyabinsk, Russia

²Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

Assessment of the lymphocyte doses is relevant for solving a number of radiobiological problems, including the risk assessment of hemoblastosis (leukemia, multiple myeloma, lymphoma, etc.), as well as the use of circulating lymphocytes as “natural biodosimeters”. The latter is because the frequency of chromosomal aberrations occurring in lymphocytes following radiation exposure is proportional to the accumulated dose. Assessment of doses to the circulating lymphocytes requires due account of: first, the dose accumulated by the lymphocyte progenitors in the red bone marrow; and second, the dose accumulated during lymphocyte circulation through lymphoid organs. The models presented by International Commission on Radiological Protection (ICRP-67, ICRP-100) allow calculating the dose for specific lymphoid organs based on known level of radionuclide intakes. A recently developed model of circulating T-lymphocyte irradiation takes into account all sources of exposure and age-related dynamics of T-lymphocytes: (1) exposure of lymphocyte progenitors in red bone marrow; (2) exposure of T-lymphocytes in the lymphoid organs, taking into account the proportion of resident lymphocytes and the residence time of circulating lymphocytes in the specific lymphoid organs. The objective of the study is to assess the dose coefficients allowing for the transition from the ingestion of ^{141,144}Ce, ⁹⁵Zr, ^{103,106}Ru, ⁹⁵Nb to the doses accumulated in circulating T-lymphocytes. For calculations, we used the dose coefficients from ICRP publications for specific lymphoid organs, as well as published data on the residence time of circulating lymphocytes in lymphoid organs and tissues. As a result, it was shown that the doses in circulating T-lymphocytes are higher than those in the red bone marrow, but lower than the doses to the colon wall. The dose coefficients were age dependent; the maximum values were typical for newborns. The obtained dose coefficients for ^{141,144}Ce, ⁹⁵Zr, ⁹⁵Nb and ^{103,106}Ru can be used to estimate the tissue and organ doses based on data on the frequency of chromosomal aberrations in peripheral blood lymphocytes.

Key words: T-lymphocytes, lymphoid organs; dose coefficients; ^{141,144}Ce, ⁹⁵Zr, ⁹⁵Nb, ^{103,106}Ru, internal exposure; biodosimetry.

References

1. Lee C, Morton LM, Berrington de González A. A novel method to estimate lymphocyte dose and application to pediatric abd yang adult CT patient in the United Kingdom. *Radiation Protection Dosimetry*. 2018;178(1): 116–121. doi: 10.1093/rpd/ncx084.
2. Boice JD Jr, Day NE, Andersen A, Brinton LA, Brown R, Choi NW, et al. Second cancers following radiation treatment for cervical cancer. An international collaboration among cancer registries. *Journal of the National Cancer Institute*. 1985;74(5): 955–75.
3. Davis FG, Boice JD, Hrubec Z, Monson RR. Cancer mortality in a radiation-exposed cohort of Massachusetts tuberculosis patients. *Cancer Research*. 1989;49(21): 6130–6136.
4. Boice JD, Morin MM, Glass AG, et al. Diagnostic X-ray procedures and risk of leukemia, lymphoma, and multiple myeloma. *Journal of the American Medical Association*. 1991;265(10): 1290–1294 doi:10.1001/jama.1991.03460100092031.
5. Leuraud K, Richardson DB, Cardis E, et al. Ionising radiation and risk of death from leukaemia and lymphoma in radiation-monitored workers (INWORKS): an international cohort study. *The Lancet Haematology*. 2015;2(7): e276–e281. [http://dx.doi.org/10.1016/S2352-3026\(15\)00094-0](http://dx.doi.org/10.1016/S2352-3026(15)00094-0).
6. Hsu WL, Preston DL, Soda M. et al. The incidence of leukemia, lymphoma and multiple myeloma among atomic bomb survivors: 1950–2001. *Radiation Research*. 2016; 179(3): 361–382 doi:10.1667/RR2892.1.
7. IAEA Cytogenetic Analysis for Radiation Dose Assessment: a Manual Technical Reports, Series 405. 2001. Available from: <http://www.pub.iaea.org/books/IAEABooks/6303/Cytogenetic-Analysis-for-Radiation-Dose-Assessment-A-Manual> [Accessed 23 July 2021].
8. Giussani A, Lopez MA, Romm H, et al. Eurados review of retrospective dosimetry techniques for internal exposures to ionising radiation and their applications. *Radiation Environmental Biophysics*. 2020;59(3): 357–387. doi: 10.1007/s00411-020-00845-y.
9. Degteva MO, Shagina NB, Vorobieva MI, et al. Contemporary Understanding of Radioactive Contamination of the Techa River in 1949–1956. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 2016;56(5): 523–534 DOI: 10.7868/S0869803116050039 (In English, In Russian).
10. Degteva MO, Tolstykh EI, Suslova KG, Romanov SA, Akleyev AV. Analysis of the results of long-lived radionuclide body burden monitoring in residents of the Urals region. *Radiatsionnaya gygiyena=Radiation Hygiene*. 2018;11(3):30–39. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-3-30-39> (In Russian).
11. Tolstykh EI, Peremyslova LM, Degteva MO, et al. Reconstruction of radionuclide intakes for residents of East Urals Radioactive Trace (1957–2011). *Radiation*

Evgenia I. Tolstykh

Urals Research Center for Radiation Medicine

Address for correspondence: Vorovsky str., 68a, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: evgenia@urcrm.ru

- Environmental Biophysics*. 2017;56: 27-45. <https://doi.org/10.1007/s00411-016-0677-y>.
12. Tolstykh EI, Vozilova AV, Degteva MO, Akleyev AV. Concept of T-Cell Genus as the Basis for the Analysis of Fish Results after Local Bone Marrow Exposure. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation biology. Radioecology*. 2020;60(1):12-25. DOI: 10.31857/S0869803120010142 (In Russian).
13. Tolstykh EI, Degteva MO, Vozilova AV, et al. Local bone-marrow exposure: how to interpret the data on stable chromosome aberrations in circulating lymphocytes? (some comments on the use of FISH method for dose reconstruction for Techa riverside Residents). *Radiation Environmental Biophysics*. 2017;56(4): 389-403. doi: 10.1007/s00411-017-0712-7.
14. Tolstykh EI, Degteva MO, Vozilova AV, et al. Interpretation of FISH results in the case of nonuniform internal radiation exposure of human body with the use of model approach. *Russian Journal of Genetics*. 2019;55(10):1227-1233.
15. Ma H, Tao W, Zhu S. T lymphocytes in the intestinal mucosa: defense and tolerance. *Cellular & Molecular Immunology*. 2019;16(3): 216-224. doi: 10.1038/s41423-019-0208-2.
16. Agace W. T-cell recruitment to the intestinal mucosa. *Trends Immunology*. 2008;29(11): 514-22. doi: 10.1016/j.it.2008.08.003.
17. Tolstykh EI, Vozilova AV, Degteva MO, Akleyev AV. Approaches to the Cytogenetic Assessment of the Dose due to Radiation Exposure of the Gut Associated Lymphoid Tissue. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation biology. Radioecology*. 2021;61(4): 339-352 (In Russian).
18. ICRP. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides – Part 2 Ingestion Dose Coefficients. ICRP Publication 67. Ann. ICRP. 1993;23 (3-4).
19. Britanova OV, Shugay M, Merzlyak EM, et al. Dynamics of individual T cell repertoires: from cord blood to centenarians. *The Journal of Immunology*. 2016;196(12): 5005-5013. doi: 10.4049/jimmunol.1600005.
20. Naumova EN, Gorski J, Naumov YN. Simulation studies for a multistage dynamic process of immune memory response to influenza: experiment in silico. *Annales Zoologici Fennici*. 2008; 45: 369-384. DOI: 10.5735/086.045.0502.
21. Yoshida K, Cologne JB, Cordova K, et al. Aging-related changes in human T-cell repertoire over 20 years delineated by deep sequencing of peripheral T-cell receptors. *Experimental Gerontology*. 2017;1(96): 29-37. doi: 10.1016/j.exger.2017.05.015.
22. Britanova OV, Putintseva EV, Shugay M, et al. Age-related decrease in TCR repertoire diversity measured with deep and normalized sequence profiling. *The Journal of Immunology*. 2014;192(6): 2689-2698. doi: 10.4049/jimmunol.1302064.
23. Attaf M, Huseby E, Sewell AK. $\alpha\beta$ T cell receptors as predictors of health and disease. *Cellular & Molecular Immunology*. 2015;12(4): 391-399. doi: 10.1038/cmi.2014.134.
24. Izraelson M, Kasatskaya S, Pogorelyi M, et al. Analysis of individual repertoires of T cell receptors. *Immunobiology*. 2016;37(6): 347-352. DOI:10.18821/0206-4952-2016-37-6-347-352.
25. Bains I. Mathematical Modelling of T Cell Homeostasis. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy of the University College London, 2010. Available from: <http://discovery.ucl.ac.uk/20159/1/20159.pdf> [Accessed 23 Jul 2021].
26. Bains I, Yates AJ, Callard RE. Heterogeneity in thymic emigrants: implications for thymectomy and immunosenescence. *PLoS One*. 2013;8(2): e49554. doi: 10.1371/journal.pone.0049554.
27. Trepel F. Number and distribution of lymphocytes in man. A critical analysis. *Klinische Wochenschrift*. 1974;52(11): 511-5. doi: 10.1007/BF01468720.
28. Westermann J and Pabst R. Distribution of lymphocyte subsets and natural killer cells in the human body. *Journal of Clinical Investigation*. 1992;70(7): 539-44. doi: 10.1007/BF00184787.
29. Blum KS, Pabst R. Lymphocyte numbers and subsets in the human blood. Do they mirror the situation in all organs? *Immunology Letters*. 2007;108(1): 45-51. doi: 10.1016/j.imlet.2006.10.009.
30. Farber DL, Yudanin NA, Restifo NP. Human memory T cells: generation, compartmentalization and homeostasis. *Nature Reviews Immunology*. 2014;14(1): 24-35. doi: 10.1038/nri3567.
31. Kumar BV, Connors TJ, Farber DL. Human T Cell Development, Localization, and Function throughout Life. *Immunity*. 2018;48(2): 202-213. doi: 10.1016/j.immuni.2018.01.007.
32. Senda T, Dogra P, Granot T, et al. Microanatomical dissection of human intestinal T-cell immunity reveals site-specific changes in gut-associated lymphoid tissues over life. *Mucosal Immunology*. 2019;12(2): 378-389. doi: 10.1038/s41385-018-0110-8.
33. Thome JJ, Bickham KL, Ohmura Y, et al. Early-life compartmentalization of human T cell differentiation and regulatory function in mucosal and lymphoid tissues. *Nature Medicine*. 2016;22(1): 72-77. doi: 10.1038/nm.4008.
34. Fell TP, Phipps AW, Smith TJ. The internal dosimetry code PLEIADES. *Radiation Protection Dosimetry*. 2007;124(4): 327-38.
35. Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, et al. Enhancements in the Techa River dosimetry system: TRDS-2016D code for reconstruction of deterministic estimates of dose from environmental exposures. *Health Physics*. 2019;117(4): 378-387. doi: 10.1097/HP.0000000000001067.
36. Racanelli V, Rehmann B. The liver as an immunological organ. *Hepatology*. 2006;43(2 Suppl 1): S54-62. doi: 10.1002/hep.21060.
37. ICRP. Report of the Task Group on Reference Man. ICRP Publication 23. Pergamon Press, Oxford. 1975.
38. ICRP. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values. A report of age- and gender-related differences in the anatomical and physiological characteristics of reference individuals, Publication 89 Ann ICRP. 2002;32(3-4): 5-265.
39. Osgood EE. Number and distribution of human hemic cells. *Blood*. 1954;9: 1141-1154. <https://doi.org/10.1182/blood.V9.12.1141.1141>.
40. Degteva MO, Shishkina EA, Tolstykh EI, Zalyapin VI, Sharagin PA, Smith MA, et al. Methodological approach to development of dosimetric models of the human skeleton for beta-emitting radionuclides. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2): 66-75. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-2-66-75>.
41. ICRP. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 2. ICRP Publication 134. Ann. ICRP. 2016;45(3/4): 1-352.

Received: July 23, 2021

For correspondence: Evgenia I. Tolstykh – Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher of biophysical laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency (Vorovsky str., 68a, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: evgenia@urcrm.ru)

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

Alexander V. Akleyev – Doctor of Medical Sciences, Professor, Director of Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency; Head of the Department of Radiation Biology, Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

For citation: Tolstykh E.I., Degteva M.O., Akleyev A.V. Estimation of lymphocyte radiation doses after the ingestion of radionuclides of different tropicity. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No. 3. P. 18-28. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-18-28

Обоснование методических подходов к контролю содержания радона в воздухе помещений эксплуатируемых общественных зданий с некруглосуточным пребыванием людей

А.С. Васильев, И.К. Романович, Д.В. Кононенко, Т.А. Кормановская, К.А. Сапрыкин, Т.А. Балабина

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

Как показывает анализ обращений за методической помощью в Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора им. П.В. Рамзаева, при проведении измерений содержания радона в воздухе эксплуатируемых общественных зданий (в первую очередь, детских учреждений) в рамках контрольно-надзорных мероприятий в субъектах Российской Федерации, как правило, руководствуются (ввиду отсутствия других утвержденных документов) методическими указаниями МУ 2.6.1.2838-11, предназначенными для проведения радиационного контроля общественных зданий и сооружений только при сдаче их в эксплуатацию после окончания строительства, капитального ремонта или реконструкции. Выполнение требований п. 6.5 МУ 2.6.1.2838-11 приводит здание и помещения в состояние, не соответствующее их нормальному режиму эксплуатации, что в итоге ведет к регистрации более высоких значений содержания радона и принятию в дальнейшем управленческих решений, предусматривающих административное приостановление деятельности на срок до 90 суток, т.е. закрытие отдельных помещений или даже всего здания детского учреждения. Результатом принятия таких решений может быть нарастание социальной напряженности в обществе и провоцирование радиофобии среди населения. В данной работе излагаются конкретные рекомендации по обследованию эксплуатируемых общественных зданий с некруглосуточным пребыванием людей на основе результатов анализа опыта практического применения различных методов измерения содержания радона в воздухе помещений для оценки среднего его содержания в рабочее время в режиме нормальной эксплуатации зданий. Предложенный подход может быть в дальнейшем положен в основу специальных методических указаний по радиационному контролю эксплуатируемых общественных зданий с некруглосуточным пребыванием людей.

Ключевые слова: радон, дочерние продукты распада, объемная активность, эквивалентная равновесная объемная активность, радоновое обследование, экспрессные измерения, интегральные методы, трековый детектор, общественные здания, детские учреждения, Кингисеппский район, Ленинградская область.

Введение

Охрана здоровья детей является одним из приоритетных направлений деятельности органов государственной власти и необходимым условием для гармоничного физического и психического развития детей¹. Положение о защите детства

обозначено в нормативном правовом акте высшей юридической силы – обновленной версии Конституции Российской Федерации². В соответствии с требованиями Федерального закона «Об образовании в Российской Федерации»³ образовательная организация при осуществлении своей деятель-

¹ Статья 7 Федерального закона от 21.11.2011 № 323-ФЗ (ред. от 22.12.2020) «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации». [Article 7 of the Federal Law No. 323-FZ of 21.11.2011 (as amended on 22.12.2020) "On the basics of protecting the health of citizens in the Russian Federation". (In Russ.)]

² Конституция Российской Федерации (принята всенародным голосованием 12.12.1993 с изменениями, одобренными в ходе общероссийского голосования 01.07.2020). [The Constitution of the Russian Federation (adopted by popular vote on 12.12.1993 with amendments approved during the all-Russian vote on 01.07.2020). (In Russ.)]

³ Статья 28 Федерального закона от 29.12.2012 № 273-ФЗ (ред. от 24.03.2021) «Об образовании в Российской Федерации». [Article 28 of the Federal Law No. 273-FZ of 29.12.2012 (as amended on 24.03.2021) "On the education in the Russian Federation". (In Russ.)]

Васильев Алексей Серафимович

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

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

ности обязана создавать безопасные условия обучения, воспитания, ухода и присмотра за обучающимися; она несет ответственность за жизнь и здоровье не только работников, но и обучающихся образовательной организации.

Одним из вредных факторов среды обитания в образовательной организации может являться радиоактивный газ радон, который при определенных условиях имеет тенденцию к накоплению в закрытых помещениях до существенных уровней. Подстилающие грунты и горные породы, содержащие ^{238}U или ^{226}Ra , являются основными источниками поступления радона в воздух помещений [1].

Так как радон не имеет органолептических свойств, единственным способом его обнаружения является проведение измерений радиометрами различных типов. Однако на данный момент методические указания по проведению радиационного контроля и санитарно-эпидемиологической оценки параметров радиационной обстановки в эксплуатируемых общественных зданиях отсутствуют как таковые, в связи с чем не регламентирован выбор и приоритетность использования того или иного метода при проведении измерений содержания радона в воздухе помещений таких зданий. Как показывает анализ обращений за методической помощью во ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, в рамках проведения контрольно-надзорных мероприятий специалисты ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии» в субъектах РФ, как правило, руководствуются (ввиду отсутствия других утвержденных методических документов) МУ 2.6.1.2838-11⁴, предназначенными для проведения радиационного контроля общественных зданий и сооружений только при сдаче их в эксплуатацию после окончания строительства, капитального ремонта или реконструкции. Для проведения измерений чаще всего используются экспрессные методы определения ЭРОА изотопов радона в воздухе, а помещения при этом подготавливаются для измерений в соответствии с требованиями п. 6.5 указанных МУ, т.е. здание и помещения предварительно выдерживаются при закрытых окнах, дверях и штатном режиме работы принудительной вентиляции (при ее наличии) не менее 12 ч. С учетом того, что, как правило, в рамках контрольно-надзорных мероприятий обследуются детские учреждения (ДУ), расположенные в зданиях старой постройки, в которых система приточно-вытяжной вентиляции отсутствует как таковая или давно не функционирует, выполнение требований п. 6.5 МУ 2.6.1.2838-11

приводит здание и помещения в состояние, не соответствующее их нормальному режиму эксплуатации, что в итоге ведет к регистрации более высоких значений содержания радона (единичных, как правило) и принятию в дальнейшем Управлениями Роспотребнадзора в субъектах РФ управленческих решений, предусматривающих в соответствии со ст. 6.4 КоАП РФ административное приостановление деятельности на срок до 90 суток, т.е. закрытие отдельных помещений, этажей или даже всего здания ДУ. Результатом принятия таких решений является нарастание социальной напряженности в обществе и провоцирование радиофобии (радиотрещотности) среди населения.

Как известно, достоверность оценки нормируемого показателя – среднегодовой эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) изотопов радона в воздухе помещений – увеличивается с ростом продолжительности измерения. По этой причине в МУ 2.6.1.2838-11 методы измерения ранжированы в порядке возрастания достоверности определения этого показателя следующим образом: экспрессные (мгновенные, инспекционные, кратковременные), квазиинтегральные и интегральные. Однако в случае проведения обследований эксплуатируемых общественных зданий с некруглосуточным пребыванием людей (например, ДУ) необходимо принимать во внимание, что критерием принятия решения о несоответствии помещений установленному нормативу должно быть не просто среднегодовое содержание радона в воздухе помещений, а среднее его содержание именно в те периоды времени, когда сотрудники и воспитанники находятся в здании.

Для проведения крупномасштабных радоновых обследований широкое применение в России и за рубежом получили пассивные интегральные методы, которые позволяют получить среднее значение объемной активности (ОА) радона за все время экспонирования интегральных трековых радиометров радона (ИТРП). Но, к сожалению, данные методы не позволяют оценить уровень содержания радона в отдельно взятые периоды обследования, как, например, при использовании автоматических радоновых мониторов. Регистрация треков альфа-частиц в ИТРП происходит и в ночное время, и в выходные и праздничные дни, и в период каникул, то есть в периоды фактического отсутствия в зданиях ДУ сотрудников и/или детей, когда предусмотренное санитарными правилами⁵,⁶ регулярное проветривание не осуществляется, вен-

⁴ 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», утвержденные 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). (In Russ.)]

⁵ Санитарно-эпидемиологические требования к организациям воспитания и обучения, отдыха и оздоровления детей и молодежи: Санитарные правила СП 2.4.3648-20. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28.09.2020 г. № 28. [Sanitary and epidemiological requirements for organizations of education and training, recreation and health improvement of children and youth. Sanitary rules SP 2.4.3648-20. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 28.09.2020 No. 28. (In Russ.)]

⁶ Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: Санитарные правила и нормы СанПиН 1.2.3685-21. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28.01.2021 г. № 2. [Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans. Sanitary rules and norms SanPiN 1.2.3685-21. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 28.01.2021 No. 2. (In Russ.)]

тиляция с механическим побуждением может быть включена, что в совокупности может приводить к росту ОА радона в воздухе помещений. Таким же недостатком обладает и квазиинтегральный метод измерений, основанный на сорбции радона активированным углем. Из этого следует, что интегральные и квазиинтегральные методы завышают реальные значения содержания радона в воздухе помещений в часы присутствия людей, рассчитанные на их основе дозы и, соответственно, риски развития радон-индуцированного рака легкого.

Основная проблема экспрессных методов заключается в том, что измеренное с их помощью значение отражает ситуацию с содержанием радона и его короткоживущих дочерних продуктов распада (ДПР) в воздухе только в конкретный момент времени, поскольку оно подвержено значительной суточной, недельной и сезонной вариабельности, основными причинами которой являются изменение метеорологических условий и режима эксплуатации помещения. Таким образом, результаты единичных измерений ЭРОА изотопов радона, проведенных экспрессными методами, с большой долей вероятности также не отражают среднее значение величины в рабочие дни и часы.

Цель исследования – выработка рекомендаций по проведению контрольно-надзорных мероприятий в эксплуатируемых общественных зданиях с некруглосуточным пребыванием людей на основе результатов анализа опыта практического применения

различных методов измерения содержания радона в воздухе помещений для оценки среднего его содержания в рабочее время в режиме нормальной эксплуатации зданий.

Материалы и методы

В рамках выполнения инициативной научно-исследовательской работы «Гигиеническая оценка уровней содержания радона в воздухе помещений детских учреждений Ленинградской области», проводимой ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева совместно с Управлением Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Ленинградской области, по результатам измерений, выполненных с помощью ИТРП (длительность экспонирования которых составила 30 суток), в Кингисеппском районе Ленинградской области был выявлен ряд ДУ с высоким содержанием радона в воздухе помещений [2] (табл. 1).

В связи с этим было принято решение о проведении детального радонометрического обследования зданий 4 ДУ, расположенных в деревнях Большая Пустомержа, Ополе и Фалилеево.

Кингисеппский район Ленинградской области считается потенциально радоноопасным ввиду сосредоточения на его территории комплекса горных пород (диктионемовых сланцев) с содержанием ^{238}U (^{226}Ra) выше фонового в 10–100 раз, которые выходят на поверхность или располагаются в непосредственной близости от земной поверхности [3–6] (рис. 1).

Таблица 1

Результаты измерений ОА радона в воздухе помещений некоторых ДУ Кингисеппского района Ленинградской области, обследованных с применением ИТРП в ноябре – декабре 2020 г.

[Table 1

Results of measurements of indoor radon concentration using SSNTDs in some children institutions of the Kingiseppsky district of the Leningrad region (November – December 2020)]

Населенный пункт [Settlement]	Тип здания [Type of institution]	Год постройки [Year of construction]	Помещение [Premise]	Этаж [Floor]	ОА _{Рн} , Бк/м ³ [Radon concentration, Bq/m ³]
д. Большая Пустомержа [Bol'shaya Pustomerzha]	Средняя общеобразовательная школа (СОШ) [School]	1964	Кабинет бухгалтера [Accountant's office]	1	1610±644
			Кабинет завуча [Head teacher's office]	1	2200±880
			Кабинет завхоза [Caretaker's office]	1	1155±462
			Медицинский кабинет [Medical room]	1	604±242
			Гардеробная [Dressing room]	1	1345±538
			Коридор [Hall]	1	410±164
д. Ополе [Opol'e]	Детский сад [Kindergarten]	1977	Группа «Буратино», игровая [“Buratino” group, game room]	1	230±92
			Группа «Аленушка», игровая [“Alenushka” group, game room]	1	334±134
			Группа «Теремок», игровая [“Teremok” group, game room]	2	210±84
			Группа «Чебурашка», игровая [“Cheburashka” group, game room]	2	104±42

Окончание таблицы 1

Населенный пункт [Settlement]	Тип здания [Type of institution]	Год постройки [Year of construction]	Помещение [Premise]	Этаж [Floor]	ОА _{РН} , Бк/м ³ [Radon concentration, Bq/m ³]
д. Фалилеево [Falileevo]	Детский сад [Kindergarten]	1968	Группа «Березка», спальня [“Beryozka” group, bedroom]	1	390±156
			Группа «Тополек», спальня [“Topolek” group, bedroom]	1	480±192
			Группа «Елочка», игровая [“Elochka” group, game room]	1	530±212
			Группа «Тополек», игровая [“Topolek” group, game room]	2	360±144
			Группа «Березка», игровая [“Beryozka” group, game room]	2	267±107
	Основная общеобразовательная школа (ООШ) [School]	1968	Кабинет № 10 [Classroom No. 10]	1	1930±772
			Кабинет № 1 [Classroom No. 1]	1	1010±404
			Кабинет № 5 [Classroom No. 5]	1	1505±602
			Кабинет № 7 [Classroom No. 7]	2	730±292
			Библиотека [Library]	3	870±348



Рис. 1. Карта прогнозной радоноопасности территории Ленинградской области (по данным ОП «РГЭЦ» АО «Урангео») [Fig. 1. Radon risk map of the districts of the Leningrad region (“RGETS”, JSC “Urangeo”): red – highest risk; pink – high risk; yellow – moderate risk; grey – low risk]

Детальные радонометрические обследования помещений 4 эксплуатируемых ДУ (школы и детские сады) были проведены в холодный (отопительный период) с 25 февраля по 25 марта 2021 г. и включали повторную установку ИТПР в ранее обследованных помещениях в каждом из

4 ДУ, 5 серий еженедельных экспрессных измерений ЭРОА изотопов радона в тех же помещениях, а также установку в 2 школах радоновых мониторов для непрерывного автоматического измерения ОА радона. Всего было получено 20 результатов измерений ОА радона, полученных с помощью пассивного интегрального метода; 100 результатов измерений ЭРОА изотопов радона, полученных с помощью экспрессного метода, а также 4 серии измерений ОА радона, полученные с помощью радоновых мониторов.

Измерения пассивным интегральным методом проводились с использованием комплекта аппаратуры «ТРЕК-РЭИ-1М» (Россия), включающего в себя пробоотборные камеры (экспозиметры) типа «РЭИ-4» с трековыми детекторами (ТД) на основе нитроцеллюлозной пленки Kodak LR-115 Type II. Основы метода, принцип работы и порядок проведения измерений детально изложены в аттестованных методиках^{7, 8}. Экспозиметры размещались на 30 суток (с 25 февраля по 25 марта) в 5 помещениях каждого обследуемого ДУ преимущественно на первом этаже (при наличии второго и третьего этажа – 1–2 экспозиметра на каждый этаж) в местах, удаленных от окон и отопительных приборов на высоте 1–2 м над уровнем пола (т.е. в зоне дыхания). Для каждого обследованного помещения заполнялся так называемый «паспорт измерения», который со-

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 indoor 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.)]

⁸ Радон. Измерение объемной активности интегральным трековым методом в производственных, жилых и общественных помещениях: Методика выполнения измерений 2.6.1.003-99. Аттестована в ЦМИИ ГП «ВНИИФТРИ» Госстандарта РФ. Свидетельство об аттестации № 45090.84769 от 08.12.1998 г. [Radon. Measurements of indoor radon concentration with SSNTDs in industrial, residential and public premises. Guidelines 2.6.1.003-99. Certified by VNIIFTRI, certificate No. 45090.84769 dated 08.12.1998. (In Russ.)]

держал полные адресные данные, период экспонирования ИТТР, а также строительно-конструкционные и иные характеристики здания (год постройки, этажность, основной материал строительных конструкций, тип окон, тип системы отопления и вентиляции). Для используемого комплекта аппаратуры, согласно приложению к свидетельству об утверждении типа средств измерений, предел допускаемой относительной погрешности измерений средней ОА радона в диапазоне от 20 до 2000 Бк/м³ составляет $\pm 40\%$.

Согласно п. 6.3 МУ 2.6.1.2838-11, для перехода от измеренных значений ОА радона к ЭРОА радона использовалось значение коэффициента радиоактивного равновесия между радоном и его ДПР, равное 0,5.

Еженедельные экспрессные измерения ЭРОА изотопов радона в период экспонирования ИТТР проводились в тех же помещениях, в которых были установлены экспозиметры, в рабочее время в режиме нормальной эксплуатации зданий (в присутствии сотрудников и/или детей, при соблюдении кратности и времени проветривания, предписанных санитарными правилами) с применением радиометров «Альфарад плюс А» (Россия), «Альфарад плюс АРП» (Россия), РАА-3-01 «АльфаАЭРО» (Россия) и РАА-10 (Россия), для которых предел допускаемой относительной погрешности, согласно паспортам средств измерений, составляет $\pm 30\%$. Всего в здании каждого обследуемого ДУ было проведено 25 экспрессных измерений ЭРОА изотопов радона.

Радоновые мониторы AlphaGUARD PQ2000PRO (Германия) были установлены в 2 школах с наиболее высокими зарегистрированными значениями ОА радона по результатам прошлых измерений: в учительской (с 25 февраля по 11 марта) и кабинете завуча (с 11 марта по 25 марта) МБОУ «Пустомержская СОШ» (д. Большая Пустомержа), а также в библиотеке (с 25 февраля по 11 марта) и кабинете № 1 (с 11 марта по 25 марта) МБОУ «Фалилеевская

ООШ» (д. Фалилеево). В каждом помещении измерения проводились на протяжении 2 недель, показания сохранялись в памяти мониторов с интервалом в 10 мин (в школе д. Фалилеево) и 1 ч (в школе д. Большая Пустомержа). Предел допускаемой относительной погрешности, согласно паспорту монитора радона, составляет $\pm 20\%$.

Перед началом статистической обработки была проведена валидация результатов измерений ОА радона и ЭРОА изотопов радона в соответствии с подходом, описанным в [7]: результаты менее нижней границы диапазона измерений (НГДИ), а также результаты измерений пассивным интегральным методом, превышающие предел насыщения ТД, равный 180 кБк-сутки/м³ (что соответствует метрологическим характеристикам комплекта аппаратуры «ТРЕК-РЭИ-1М», указанным в приложении к свидетельству об утверждении данного типа средств измерений), получены не были. Результаты измерений ЭРОА торона не превысили значения НГДИ соответствующих средств измерений и далее не рассматриваются.

Следует отметить, что последние 4 дня непрерывной регистрации ОА радона с помощью мониторов в помещениях «Пустомержской СОШ» и «Фалилеевской ООШ», на которые пришлась и последняя серия еженедельных экспрессных измерений, совпали с периодом школьных весенних каникул, что позволило в дальнейшем выявить некоторые различия в динамике ОА радона в зависимости от присутствия только сотрудников или сотрудников и детей одновременно и, как следствие, соблюдения предписанного режима проветривания.

Результаты и обсуждение

Обобщенные результаты обследований 4 ДУ Кингисеппского района Ленинградской области представлены в таблице 2. Видно, что результаты интегральных измерений среднесуточной ОА радона, пересчитан-

Таблица 2

Обобщенные результаты измерений содержания радона в воздухе помещений обследованных ДУ (интегральный и экспрессный методы)

[Table 2

Averaged results of measurements of indoor radon EEC in four surveyed children institutions of the Kingiseppsky district of the Leningrad region (long-term and instant measurements)]

Детское учреждение [Settlement, institution]	ЭРОА _{гн} (интегральный метод), Бк/м ³ [Radon EEC (long-term measurements), Bq/m ³]			ЭРОА _{гн} (экспрессный метод), Бк/м ³ [Radon EEC (instant measurements), Bq/m ³]			R _{L/1} , отн. ед.
	СА [AM]	ИЗ [Range]	СО [SD]	СА [AM]	ИЗ [Range]	СО [SD]	
д. Ополье, детский сад [Opol'e, Kindergarten]	50	21–106	35	12	3–31	7	4,2 (2,0–8,4)
д. Фалилеево, детский сад [Falileevo, Kindergarten]	60	24–81	22	19	6–62	12	3,2 (1,7–5,3)
д. Фалилеево, школа [Falileevo, School]	418	331–476	60	220	30–368	91	1,9 (1,6–3,2)
д. Большая Пустомержа, школа [Bol'shaya Pustomerzha, School]	704	288–1300	377	232	12–607	172	3,0 (1,6–4,3)

СА – среднее арифметическое значение; ИЗ – интервал значений; СО – стандартное отклонение; R_{L/1} – отношение среднего арифметического значения по результатам интегральных измерений к среднему арифметическому значению по результатам экспрессных измерений (с диапазоном по отдельным помещениям)

[AM – arithmetic mean; SD – standard deviation; R_{L/1} – ratio of AM of long-term measurement results to AM of instant measurement results (range by individual premises). Standard Russian value of equilibrium factor F=0.5 is used throughout the paper for conversion of radon concentration into EEC where necessary (long-term and radon monitor measurement results)]

ные в значения ЭРОА с помощью стандартного значения коэффициента равновесия между радоном и его ДПР, равного 0,5, превышают средние результаты многократных экспрессных измерений в 2–4 раза.

В помещениях МБОУ «Фалилеевская ООШ» и МБОУ «Пустомержская СОШ» высокие значения ЭРОА радона по результатам экспрессных измерений были зафиксированы 25 марта, в период школьных весенних каникул (с 22 по 28 марта 2021 г.), а в помещениях МБОУ «Пустомержская СОШ» не только в период каникул, но и 25 февраля, когда все учащиеся были задействованы в проведении внешкольного мероприятия и не находились в здании (рис. 2). В остальные дни при одновременном

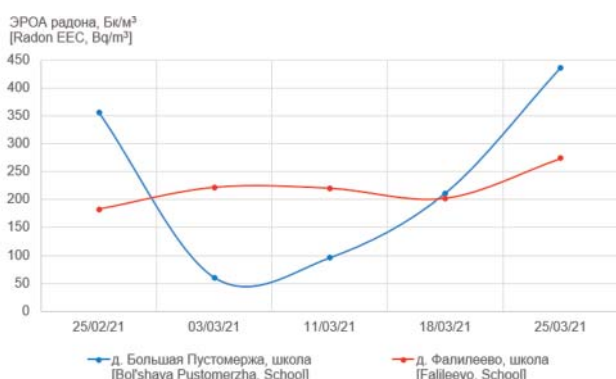


Рис. 2. Временная серия средних результатов измерений ЭРОА радона в воздухе помещений 2 обследованных школ экспрессным методом

[Fig. 2. Time series of average indoor radon EEC instant measurement results in two surveyed schools of the Kingiseppsky district of the Leningrad region]

присутствии детей и сотрудников и соблюдении предписанного режима проветривания содержание радона в воздухе помещений было заметно ниже.

Необходимо отметить хорошую сходимость результатов, полученных пассивным интегральным методом, и средних результатов измерений мониторами радона (расхождение составляет от 3 до 20%). Отношение полученных с помощью мониторов результатов после пересчета в ЭРОА радона к результатам экспрессных измерений с использованием коэффициента равновесия $F=0,5$ также составляет 2–3 раза (табл. 3).

Наибольший интерес представляет разбиение всего массива результатов измерений с помощью мониторов радона на отдельные временные периоды: дневное и ночное время, рабочие и выходные дни. Из данных, представленных в таблице 4, видно, что в дневное время результаты измерений с помощью мониторов превышают результаты экспрессных измерений от 1,5 до 4 раз, при этом в рабочие дни – только в 1,5–2 раза. Ночные значения стабильно превышают дневные вне зависимости от деления на рабочие и выходные дни (табл. 5). Результаты пассивных интегральных измерений немного превышают результаты, полученные с помощью мониторов в дневное время (в среднем в 1,1–1,3 раза), а максимальная сходимость наблюдается в ночное время (в среднем отношение составляет 0,9–1,1 раза).

На временных сериях результатов измерений с помощью мониторов (рис. 3–6) выявляются характерные паттерны суточного изменения ОА радона в воздухе, обусловленного изменением режима эксплуатации помещений (выделены на графиках рамками): снижение с началом рабочего дня и повышение с его окончанием. При этом на общий ход кривой оказывают влияние атмос-

Таблица 3

Сопоставление средних результатов измерений содержания радона в воздухе помещений обследованных ДУ (3 метода)

Table 3

Comparison of the average results of measurements of indoor radon EEC in surveyed children institutions (3 measurement methods)]

Детское учреждение, помещение [Settlement, institution, premise]	ЭРОА _{Rn} (интеграл), Бк/м³ [Radon EEC (long-term measurements), Bq/m³]	ЭРОА _{Rn} (монитор), Бк/м³ [Radon EEC (radon monitor measurements), Bq/m³]	ЭРОА _{Rn} (экспресс), Бк/м³ [Radon EEC (instant measurements), Bq/m³]	R _{М/И} , отн. ед.
д. Большая Пустомержа, школа, учительская [Bol'shaya Pustomerzha, School, teachers' lounge]	556	525	226 c _v =0,67	2,3
д. Большая Пустомержа, школа, кабинет завуча [Bol'shaya Pustomerzha, School, Head teacher's office]	784	876	272 c _v =0,75	3,2
д. Фалилеево, школа, библиотека [Falileevo, School, library]	476	464	294 c _v =0,20	1,6
д. Фалилеево, школа, кабинет № 1 [Falileevo, School, classroom No. 1]	415	331	129 c _v =0,28	2,6

c_v – коэффициент вариации; R_{М/И} – отношение среднего арифметического значения по результатам измерений с помощью монитора радона к среднему арифметическому значению по результатам экспрессных измерений
[c_v – coefficient of variation; R_{М/И} – ratio of arithmetic mean of radon monitor measurement results to arithmetic mean of instant measurement results]

Таблица 4

Сопоставление результатов измерений содержания радона в воздухе помещений обследованных ДУ с помощью монитора радона в дневное время с другими методами

[Table 4]

Comparison of the results of measurements of indoor radon EEC in surveyed children institutions using radon monitor during the daytime with other methods]

Детское учреждение, помещение [Settlement, institution, premise]	ЭРОА _{Rn} (экспресс), Бк/м ³ [Radon EEC (instant measure- ments), Bq/m ³]	ЭРОА _{Rn} (интеграл), Бк/м ³ [Radon EEC (long- term measure- ments), Bq/m ³]	ЭРОА _{Rn} (монитор), Бк/м ³ [Radon EEC (radon monitor measurements), Bq/m ³]		
			Дневное время (08:00–18:00) [Daytime (08:00–18:00)]		
			Все дни [All days]	Рабочие дни [Working days]	Выходные дни [Weekend]
д. Большая Пустомержа, школа, учительская [Bol'shaya Pustomerzha, School, teachers' lounge]	226	556	428 $R_{M/I}=1,9$ $R_{L/M}=1,3$	355 $R_{M/I}=1,6$ $R_{L/M}=1,6$	545 $R_{M/I}=2,4$ $R_{L/M}=1,0$
д. Большая Пустомержа, школа, кабинет завуча [Bol'shaya Pustomerzha, School, Head teacher's office]	272	784	800 $R_{M/I}=2,9$ $R_{L/M}=1,0$	569 $R_{M/I}=2,1$ $R_{L/M}=1,4$	995 $R_{M/I}=3,7$ $R_{L/M}=0,8$
д. Фалилеево, школа, библиотека [Falileevo, School, library]	294	476	428 $R_{M/I}=1,5$ $R_{L/M}=1,1$	449 $R_{M/I}=1,5$ $R_{L/M}=1,1$	391 $R_{M/I}=1,3$ $R_{L/M}=1,2$
д. Фалилеево, школа, кабинет №1 [Falileevo, School, classroom No. 1]	129	415	302 $R_{M/I}=2,3$ $R_{L/M}=1,4$	307 $R_{M/I}=2,4$ $R_{L/M}=1,4$	298 $R_{M/I}=2,3$ $R_{L/M}=1,4$

$R_{M/I}$ – отношение среднего арифметического значения по результатам измерений с помощью монитора радона к среднему арифметическому значению по результатам экспрессных измерений; $R_{L/M}$ – отношение результата пассивного интегрального измерения к среднему арифметическому значению по результатам измерений с помощью монитора радона

[$R_{M/I}$ – ratio of arithmetic mean of radon monitor measurement results to arithmetic mean of instant measurement results; $R_{L/M}$ – ratio of the long-term measurement result to arithmetic mean of radon monitor measurement results]

Таблица 5

Сопоставление результатов измерений содержания радона в воздухе помещений обследованных ДУ с помощью монитора радона в ночное время с другими методами

[Table 5]

Comparison of the results of measurements of indoor radon EEC in surveyed children institutions using radon monitor during the nighttime with other methods]

Детское учреждение, помещение [Settlement, institution, premise]	ЭРОА _{Rn} (экспресс), Бк/м ³ [Radon EEC (instant measure- ments), Bq/m ³]	ЭРОА _{Rn} (интеграл), Бк/м ³ [Radon EEC (long-term measurements), Bq/m ³]	ЭРОА _{Rn} (монитор), Бк/м ³ [Radon EEC (radon monitor measurements), Bq/m ³]		
			Ночное время (19:00–07:00) [Nighttime (19:00-07:00)]		
			Все дни [All days]	Рабочие дни [Working days]	Выходные дни [Weekend]
д. Большая Пустомержа, школа, учительская [Bol'shaya Pustomerzha, School, teachers' lounge]	226	556	606 $R_{M/I}=2,7$ $R_{L/M}=0,9$	429 $R_{M/I}=1,9$ $R_{L/M}=1,3$	843 $R_{M/I}=3,7$ $R_{L/M}=0,7$
д. Большая Пустомержа, школа, кабинет завуча [Bol'shaya Pustomerzha, School, Head teacher's office]	272	784	940 $R_{M/I}=3,5$ $R_{L/M}=0,8$	785 $R_{M/I}=2,9$ $R_{L/M}=1,0$	1094 $R_{M/I}=4,0$ $R_{L/M}=0,7$
д. Фалилеево, школа, библиотека [Falileevo, School, library]	294	476	495 $R_{M/I}=1,7$ $R_{L/M}=1,0$	486 $R_{M/I}=1,7$ $R_{L/M}=1,0$	512 $R_{M/I}=1,7$ $R_{L/M}=0,9$
д. Фалилеево, школа, кабинет №1 [Falileevo, School, classroom No. 1]	129	415	356 $R_{M/I}=2,8$ $R_{L/M}=1,2$	366 $R_{M/I}=2,8$ $R_{L/M}=1,1$	347 $R_{M/I}=2,7$ $R_{L/M}=1,2$

$R_{M/I}$ – отношение среднего арифметического значения по результатам измерений с помощью монитора радона к среднему арифметическому значению по результатам экспрессных измерений; $R_{L/M}$ – отношение результата пассивного интегрального измерения к среднему арифметическому значению по результатам измерений с помощью монитора радона

[$R_{M/I}$ – ratio of arithmetic mean of radon monitor measurement results to arithmetic mean of instant measurement results; $R_{L/M}$ – ratio of the long-term measurement result to arithmetic mean of radon monitor measurement results]

ОА радона, Бк/м³ [Radon concentration, Bq/m³]

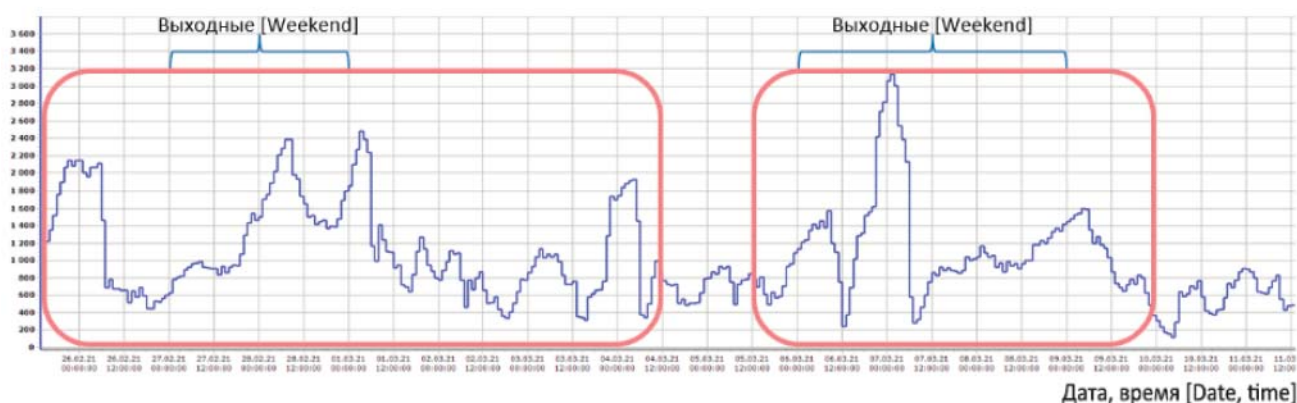


Рис. 3. Временная серия результатов измерений ОА радона с помощью монитора AlphaGUARD в МБОУ «Пустомержская СОШ» (учительская, 25 февраля – 11 марта 2021 г.)

[Fig. 3. Time series of radon concentration measurement results (AlphaGUARD) at Bol'shaya Pustomerzha, School, teachers' lounge (February 25 – March 11, 2021). Characteristic patterns of daily variation in radon concentration due to changes in the operating mode of premises are marked with frames]

ОА радона, Бк/м³ [Radon concentration, Bq/m³]

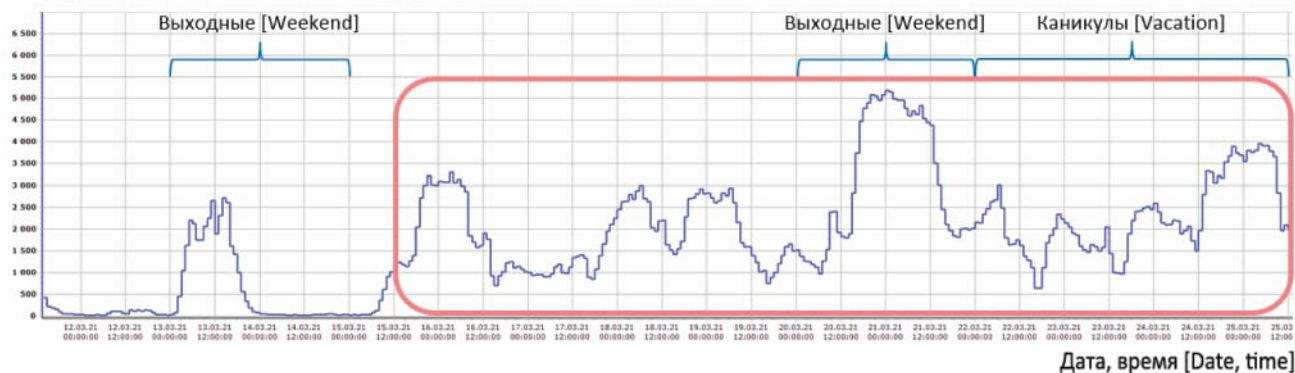


Рис. 4. Временная серия результатов измерений ОА радона с помощью монитора AlphaGUARD в МБОУ «Пустомержская СОШ» (кабинет завуча, 11–25 марта 2021 г.)

[Fig. 4. Time series of radon concentration measurement results (AlphaGUARD) at Bol'shaya Pustomerzha, School, Head teacher's office (March 11–25, 2021). Characteristic patterns of daily variation in radon concentration due to changes in the operating mode of premises are marked with frames]

ОА радона, Бк/м³ [Radon concentration, Bq/m³]

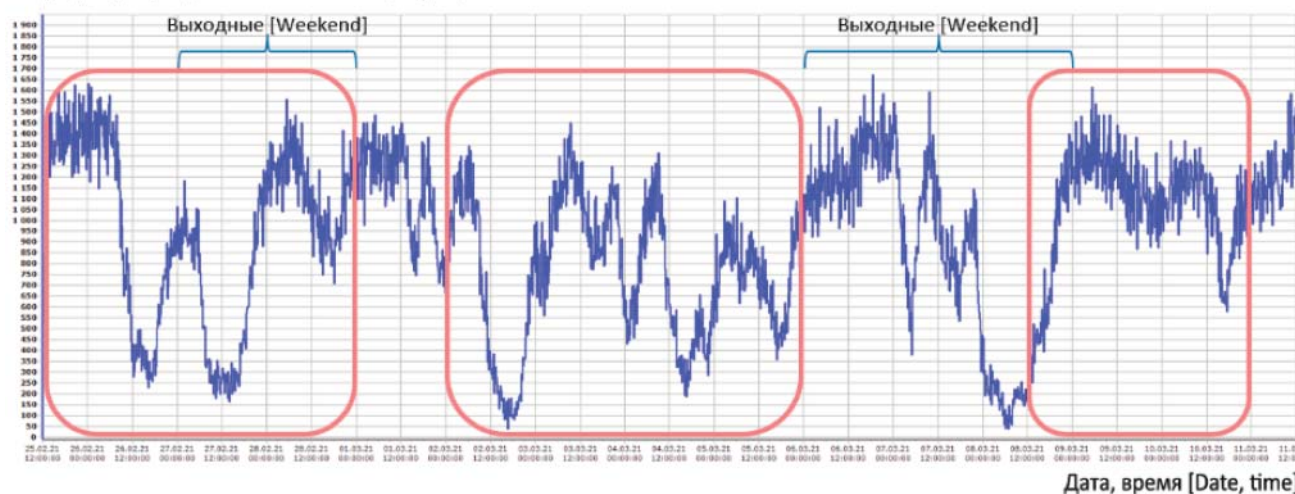


Рис. 5. Временная серия результатов измерений ОА радона с помощью монитора AlphaGUARD в МБОУ «Фалилеевская ООШ» (библиотека, 25 февраля – 11 марта 2021 г.)

[Fig. 5. Time series of radon concentration measurement results (AlphaGUARD) at Falileev, School, library (February 25 – March 11, 2021). Characteristic patterns of daily variation in radon concentration due to changes in the operating mode of premises are marked with frames]

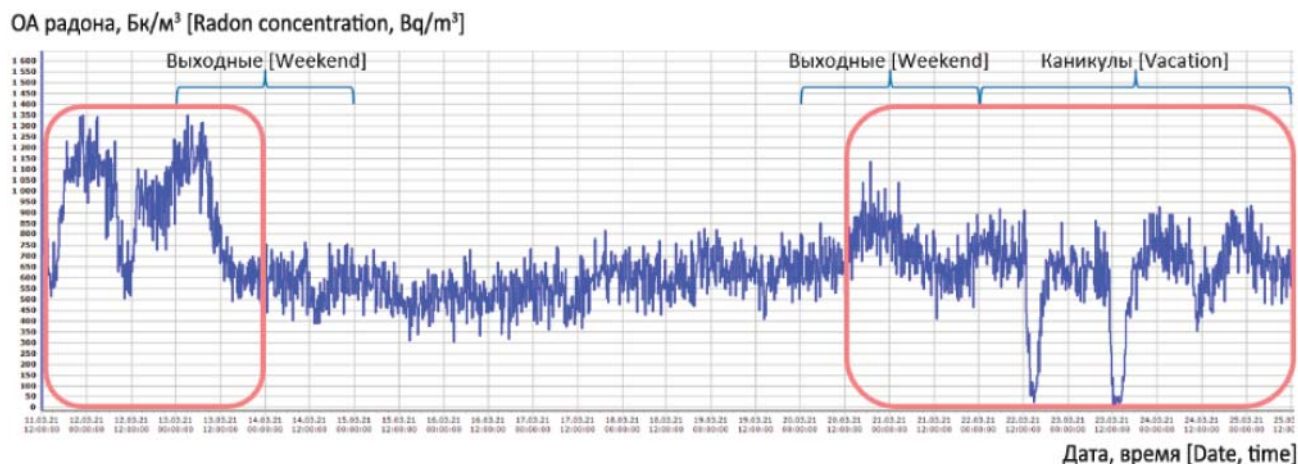


Рис. 6. Временная серия результатов измерений ОА радона с помощью монитора AlphaGUARD в МБОУ «Фалилеевская ООШ» (кабинет № 1, 11–25 марта 2021 г.)

[Fig. 6.] Time series of radon concentration measurement results (AlphaGUARD) at Falileevo, School, classroom No. 1 (March 11–25, 2021). Characteristic patterns of daily variation in radon concentration due to changes in the operating mode of premises are marked with frames]

ферные параметры, и в ряде случаев оно оказывается значительнее влияния режима эксплуатации помещений.

На рисунках 4 и 6 обращают на себя внимание различия в суточном ходе ОА радона в выходные дни и в период каникул. Во втором случае заметен характерный паттерн, связанный с регулярным изменением режима эксплуатации помещений, поскольку для сотрудников школ каникулы являются рабочими днями, и даже если предписанный режим проветривания в отсутствие учеников не соблюдается, то открывание-закрывание дверей и эпизодические проветривания оказывают заметное влияние на содержание радона и его ДПР в помещении.

Заключение

Пассивный интегральный метод измерения ОА радона имеет ряд неоспоримых преимуществ, таких как простота установки ИТПР в помещениях, что дает возможность провести ее силами самих сотрудников обследуемых учреждений при наличии соответствующей инструкции, а также возможность отправки ИТПР почтовой связью в отдаленные регионы, что может обеспечить одномоментный охват большого числа населенных пунктов в разных регионах и возможность проведения таких обследований при неблагоприятной санитарно-эпидемиологической обстановке на территориях. Но, несмотря на перечисленные достоинства, интегральный метод за счет усреднения ОА радона за весь период экспонирования ИТПР завышает реальные значения содержания радона в атмосфере помещений, в которой находятся дети и/или сотрудники ДУ, в среднем от 2 до 4 раз по сравнению со

значениями, полученными на основе многократных экспрессных измерений в рабочее время. При этом ИТПР завышают результаты измерения ОА радона по сравнению с показаниями мониторов радона в дневное время не более чем на 30%, а полная сходимость их результатов наблюдается в ночное время.

Исходя из этого, использование результатов измерений ОА радона пассивным интегральным методом в сочетании со стандартным значением коэффициента радиоактивного равновесия $F=0,5$ (при отсутствии реальных значений, полученных по результатам специальных многократных синхронных измерений ОА и ЭРОА радона в воздухе) для принятия решений о соответствии помещений ДУ с некруглосуточным режимом работы требованиям санитарных правил является некорректным.

Одной из актуальных на сегодняшний день задач является проведение измерений содержания радона в воздухе помещений эксплуатируемых общественных зданий старой постройки, в которых не проводилось радиационное обследование перед вводом в эксплуатацию, а также зданий, введенных в эксплуатацию после внесения в 2006 г. изменений в Градостроительный кодекс Российской Федерации⁹, согласно которым органы Роспотребнадзора не принимают участие в государственной приемке объектов законченного строительства¹⁰. Преобладание таких зданий требует проведения массовых радонометрических обследований, при которых использование автоматических радоновых мониторов, предназначенных для решения исследовательских задач, практически нереально в виду дороговизны и ма-

⁹ Федеральный закон от 18.12.06 № 232-ФЗ «О внесении изменений в Градостроительный кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации». [Federal Law No. 232-FZ of 18.12.06 "On Amendments to the Urban Planning Code of the Russian Federation and certain Legislative Acts of the Russian Federation". (In Russ.)]

¹⁰ Письмо Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека от 14.02.07 № 0100/1541-07-32 «О работе органов Роспотребнадзора в связи с принятием Федерального закона Российской Федерации «О внесении изменений в Градостроительный кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации»». [Letter of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing dated 14.02.07 No. 0100/1541-07-32 "On the work of Rospotrebnadzor bodies in connection with the adoption of the Federal Law of the Russian Federation «On Amendments to the Urban Planning Code of the Russian Federation and certain Legislative Acts of the Russian Federation»". (In Russ.)]

лочисленности парка такого оборудования. Экспрессный метод также не может обеспечить значительного количества одновременно обследуемых объектов, в отличие от интегрального, и требует присутствия в зданиях ДУ специалистов, проводящих радонометрическое обследование, и следовательно, использование этого метода может являться нежелательным со стороны служб безопасности ДУ и затруднительным в условиях карантинных ограничений. Кроме того, из-за суточной, недельной и сезонной вариабельности содержания радона в воздухе помещений эксплуатируемых зданий для корректной оценки среднего значения ЭРОА изотопов радона в рабочее время в режиме нормальной эксплуатации здания с помощью экспрессного метода требуется проведение многократных измерений в разные периоды времени и разные дни недели.

Об использовании «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» прямо 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». С учетом вышеизложенного, считаем целесообразным предложить использование результатов измерений пассивным интегральным методом при проведении массовых «скрининговых» обследований эксплуатируемых общественных зданий на содержание радона в качестве предварительной оценки (по аналогии с подходом к оценке радиационной безопасности питьевой воды). Если по результатам радонометрического обследования здания с использованием пассивного интегрального метода в холодный (отопительный) период года расчетное значение ЭРОА радона с использованием стандартного значения коэффициента радиоактивного равновесия $F=0,5$ и с учетом неопределенности результата измерения не превышает установленный гигиенический норматив 200 Бк/м^3 , то здание признается соответствующим требованиям нормативных документов (надежность такой оценки гарантируется консервативностью результатов, получаемых этим методом) и не включается в план дополнительных обследований. В случае, если расчетное значение ЭРОА радона превышает 200 Бк/м^3 , необходимо проведение детального обследования здания в рабочее время в режиме нормальной эксплуатации с использованием других радонометрических методов – экспрессных или непрерывных с использованием мониторов радона. Решение о несоответствии эксплуатируемого общественного здания (кроме функционирующих в круглосуточном режиме) требованиям санитарных правил на основании превышения гигиенического норматива по результатам пассивных интегральных измерений не принимается, пока результаты не уточнены с использованием методов, позволяющих проводить обследование в конкретные часы пребывания людей в здании при соблюде-

нии кратности и времени проветривания, предписанных санитарными правилами.

Проведение дополнительных измерений в эксплуатируемых ДУ с некруглосуточным пребыванием людей (школы, детские сады и др.) в теплый период года для полноценной оценки среднегодового значения ЭРОА изотопов радона считаем нецелесообразным ввиду отсутствия в летние месяцы школьных занятий, а также естественного увеличения кратности и длительности проветривания помещений в детских садах, что, в свою очередь, приводит к существенному снижению содержания радона в воздухе помещений.

Накопленный к настоящему моменту опыт методической помощи Управлениям Роспотребнадзора в субъектах РФ позволяет однозначно судить о несовершенстве существующих методических подходов к радоновому контролю эксплуатируемых общественных зданий, особенно с некруглосуточным пребыванием людей (в первую очередь, детских учреждений). Актуальность разработки специальных указаний по обследованию таких объектов не вызывает сомнения, поскольку минимизация применения избыточных санкций со стороны надзорных органов (заккрытие отдельных помещений, этажей или всего здания целиком на основе результатов однократных измерений содержания радона в воздухе, выполненных лишь одним методом) исключит или как минимум поможет снизить негативные социальные последствия и уровень радиophobia среди подрастающего поколения и населения субъектов Российской Федерации в целом.

Литература

1. Киселев С.М., Жуковский М.В., Стамат И.П., Ярмошенко И.В. Радон: От фундаментальных исследований к практике регулирования. М.: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2016. 432 с.
2. Кормановская Т.А., Историк О.А., Романович И.К., и др. Исследование уровней содержания радона в воздухе помещений зданий детских учреждений // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 2. С. 6–20. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-2-6-20.
3. Балахонова А.С. Рениевое оруденение в диктионемовых сланцах Прибалтийского бассейна (Ленинградская область): дис. ... канд. геол.-мин. наук. СПб., 2014. 125 с.
4. Михайлов В.А., Вялов В.И., Миронов Ю.Б., и др. Новые данные по ураноносности диктионемовых сланцев Прибалтийского бассейна (Кайболово-Гостилицкая площадь, Ленинградская область) // Разведка и охрана недр. 2015. № 10. С. 56–60.
5. Вялов В.И., Богомолов А.Х., Михайлов В.А., и др. Ураноносность диктионемовых сланцев Кайболово-Гостилицкой площади Прибалтийского бассейна (Ленинградская область) // Вестник Московского Университета. Серия 4: Геология. 2017. № 4. С. 25–30.
6. Ефремова У.С. Влияние радиоактивных свойств диктионемовых сланцев на экологическую обстановку территории Балтийско-Ладожского глинта (Ленинградская область) // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2018. Т. 29, № 3. С. 39–52. DOI: 10.21513/0207-2564-2018-3-39-52.
7. Кононенко Д.В. Анализ распределений значений объемной активности радона в воздухе помещений в субъектах Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 1. С. 85–103. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-85-103.

Поступила: 04.08.2021 г.

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

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

Кононенко Дмитрий Викторович – научный сотрудник лаборатории дозиметрии природных источников Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Кормановская Татьяна Анатольевна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории дозиметрии природных источников Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Сапрыкин Кирилл Александрович – старший научный сотрудник, заведующий лабораторией дозиметрии природных источников Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

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

Для цитирования: Васильев А.С., Романович И.К., Кононенко Д.В., Кормановская Т.А., Сапрыкин К.А., Балабина Т.А. Обоснование методических подходов к контролю содержания радона в воздухе помещений эксплуатируемых общественных зданий с некруглосуточным пребыванием людей // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 3. С. 29-40. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-29-40

Substantiation of methodical approaches to the control of indoor radon concentration in existing public buildings with non-round-the-clock stay of people

Alexey S. Vasilyev, Ivan K. Romanovich, Dmitry V. Kononenko, Tatyana A. Kormanovskaya, Kirill A. Saprykin, Tatyana A. Balabina

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

According to the analysis of requests for methodological assistance to the Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, measurements of radon concentration (or radon EEC) in existing operated public buildings (primarily children institutions) in the framework of surveillance actions in the regions of the Russian Federation, as a rule, are taken according to Guidelines MU 2.6.1.2838-11, intended for radiation control of public buildings only when they are put into operation after construction, major repairs or reconstruction, due to the absence of special guidelines. Compliance with the requirements of paragraph 6.5 of MU 2.6.1.2838-11 means that the building and premises are in a state that is not equal to their normal operation mode. Registration of high values of indoor radon concentration in this case leads to management decisions, including administrative suspension of activities for up to ninety days, i.e. the closure of individual premises or even the entire building of a children institution. The consequences of making such decisions may include an increase in social tension in society and provoking radiophobia among the popula-

Alexey S. Vasilyev

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

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

tion. The paper presents specific recommendations for the radon survey for existing operated public buildings with non-round-the-clock stay of people, which are based on the results of the analysis of the experience of practical application of various methods of measuring indoor radon concentrations in such buildings in order to assess average radon concentration during working hours in the normal operation mode. The proposed approach can be further used as the basis for developing special guidelines for radiation control of existing operated public buildings with non-round-the-clock stay of people.

Key words: radon, progeny, radon concentration, equilibrium equivalent concentration, survey, instant measurement, long-term measurement, SSNTD, public building, children institution, Kingiseppsky district, Leningrad region.

References

1. 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 p. (In Russian)
2. Kormanovskaya TA, Istorik OA, Romanovich IK, Eremina LA, Koroleva NA, Balabina TA, et al. Radon surveys in the buildings of children institutions. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(2): 6–20. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-2-6-20. (In Russian)
3. Balakhonova AS. Rhenium mineralization in dictyonema shales of the Baltic basin (Leningrad region). PhD thesis. St. Petersburg; 2014. 125 p. (In Russian)
4. Mikhaylov VA, Vyalov VI, Mironov YuB, Iskyul GS, Lodygin AN. New data on uranium-bearing shale dictyonema at Baltic Sea (Kaybolovo-Gostilitsy area, Leningrad region). *Razvedka i okhrana nedr = Prospect and protection of mineral resources*. 2015;10: 56–60. (In Russian)
5. Vyalov VI, Bogomolov AH, Mihailov VA, Semenov EV. Uranium of dictyonema shale of Kajbolovo-Gostilitsy area of Baltic basin (Leningrad region). *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 4: Geologiya = Moscow University Geology Bulletin*. 2017;4: 25–30. (In Russian)
6. Efremova US. Influence of radioactive properties of dictyonema shales on the environment of the territory of the Baltic klint (Leningrad region). *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem = Ecological monitoring and ecosystem modelling*. 2018;29(3): 39–52. DOI: 10.21513/0207-2564-2018-3-39-52. (In Russian)
7. 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. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-85-103. (In Russian)

Received: August 04, 2021

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

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

Dmitry V. Kononenko – Researcher of the Laboratory for dosimetry of natural sources of radiation, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

Tatyana A. Kormanovskaya – PhD, Leading researcher of the Laboratory for dosimetry of natural sources of radiation, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

Kirill A. Saprykin – Senior researcher, Head of the Laboratory for dosimetry of natural sources of radiation, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

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

For citation: Vasilyev A.S., Romanovich I.K., Kononenko D.V., Kormanovskaya T.A., Saprykin K.A., Balabina T.A. Substantiation of methodical approaches to the control of indoor radon concentration in existing public buildings with non-round-the-clock stay of people. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No. 3. P. 29-40. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-29-40

Прогностическая оценка риска рака легкого при сочетании действия радона и курения с использованием аддитивно-мультипликативной модели риска

М.В. Жуковский, И.В. Ярмошенко, А.Д. Онищенко, Г.П. Малиновский

Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

В работе обосновано применение геометрической смешанной аддитивно-мультипликативной модели для моделирования риска возникновения рака легкого при сочетании действия радона и курения. Использование геометрической смешанной модели позволяет: 1) снизить расхождения в оценках риска рака легкого для мужчин и женщин, 2) прогнозировать риск при изменении распространенности курения и изменении среднего уровня объемной активности радона. С применением геометрической смешанной модели проведен расчет рисков возникновения рака легкого для населения Российской Федерации при изменении процентного распределения курящих среди населения, увеличения ожидаемой средней продолжительности жизни и изменения среднего уровня объемной активности радона в жилых зданиях. В предположении, что среднее значение объемной активности радона в России в настоящее время округленно, с учетом всех типов зданий, составляет 50 Бк/м³, вклад радона в общую смертность в 2009 г. составлял 0,46% и 0,20% для мужчин и женщин соответственно. Моделирование показало, что эффект снижения заболеваемости раком легкого вследствие прогнозируемого снижения доли курящего населения отчасти будет нивелироваться ростом числа случаев реализации риска рака легкого при увеличении ожидаемой продолжительности жизни. Для гипотетической ситуации, когда все население ведет здоровый образ жизни, смертность от сердечно-сосудистых, онкологических, инфекционных заболеваний, заболеваний респираторного тракта и от внешних причин значительно снизилась, вклад радона в общую смертность вырастет до примерно 0,8%. В случае, если за счет широкого применения энергоэффективных технологий в строительстве средний уровень содержания радона в зданиях повысится, вклад радона в общую смертность будет еще более ощутим.

Ключевые слова: радон, курение, рак легкого, риск, модель, прогноз.

Введение

При оценке радиационно-индуцированных онкологических заболеваний, как правило, рассматриваются две основные модели радиационного риска: модель абсолютного риска (аддитивная), модель относительного риска (мультипликативная). Согласно первой модели, дополнительная частота возникновения радиационно-индуцированного рака не зависит от спонтанной частоты заболевания. В соответствии со второй моделью облучение вызывает увеличение вероятности заболевания, пропорциональное спонтанной частоте возникновения заболевания данной локализации [1–6]. При радиационном воздействии редкоизионизирующего β - или γ -излучения (линейная передача энергии, ЛПЭ ≤ 10 кэВ/мкм) для различных органов и тканей либо выделяется какой-то доминирующий механизм радиационных эффектов (мультипликативный или аддитивный) [7, 8], либо эти механизмы рассматриваются как равноправные [1]. Для облучения легочных тканей α -излучением при ингаляционном по-

ступлении ДПР радона, соответствующем плотноионизирующему излучению (ЛПЭ ~ 75 кэВ/мкм), доминирующим механизмом радиационно-индуцированного канцерогенеза традиционно рассматривалась только мультипликативная модель радиационного риска [3–6, 9].

Данные, используемые для построения моделей радиационного риска при облучении радоном, были получены исключительно по результатам эпидемиологических исследований когорт шахтеров урановых рудников. Исходные эпидемиологические данные, анализируемые в этих исследованиях, имеют ряд особенностей, принципиально ограничивающих применение предложенных моделей для популяции в целом:

— все эпидемиологические данные были получены исключительно для мужчин, поскольку женщины в урановых шахтах не работали;

— доминирующая часть членов наблюдаемых групп шахтеров были курильщиками, и доля курящих в этих группах превышала долю курящих для населения в целом.

Малиновский Георгий Петрович

Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук

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

Было показано, что прямое применение мультипликативных моделей радиационного риска, полученных на основе анализа популяций шахтеров (когорты мужчин), к населению в целом, т.е. как к мужчинам, так и к женщинам, приводит к результатам, которые сложно интерпретировать с точки зрения радиобиологии [10, 11]. Так, например, значения относительной биологической эффективности (ОБЭ), рассчитанные путем сопоставления показателей радиационного риска при воздействии редкоионизирующего излучения и ингаляционного облучения ДПР радона, различались для мужчин и женщин в 5 раз [10]. Аналогичные результаты были получены при расчете коэффициентов перехода от экспозиции по ДПР радона к эффективной дозе методом условного дозового перехода (*dose conversion convention*) [12], заключающегося в сопоставлении ущерба от общего облучения человека, выраженного в мЗв, и облучения ДПР радона, выраженного во внесистемных единицах WLM (РУМ) или Бк·ч·м⁻³ [11]. Как и в случае расчета ОБЭ, разница в коэффициентах дозового перехода от экспозиции по ДПР радона к эффективной дозе для мужчин и женщин отличалась примерно в 5 раз. Необходимо отметить, что полученные в работе [11] оценки для мужчин хорошо согласовывались с данными по расчету коэффициента дозового перехода с использованием как дозиметрического, так и эпидемиологического подходов [13].

Причиной этого различия является то, что для расчетов показателей радиационного риска при ингаляционном облучении ДПР радона использовались исключительно мультипликативные модели радиационного риска, в которых, как было указано выше, вероятность радиационно-индуцированного заболевания пропорциональна спонтанной частоте возникновения заболевания данной локализации. Для мужчин и женщин частота спонтанной заболеваемости раком легкого различается примерно в 5 раз [14], чем и объясняется полученная разница в коэффициентах. Причина столь существенного различия в частоте спонтанного возникновения рака легкого между мужчинами и женщинами очевидна – курение: практически во всех странах доля курящих мужчин в популяции превышает долю курящих женщин.

В некоторых работах отмечается, что даже при одинаковом употреблении табака риск возникновения рака легкого у женщин ниже, чем у мужчин [15–17]. Объяснений такому явлению может быть несколько: более легкие марки используемого табака, менее глубокие затяжки при курении, особенности физиологии женского организма. Однако, по данным других работ, относительный риск для мужчин и женщин при одинаковом статусе по курению является сопоставимым, а в ряде случаев относительный риск для женщин выше, чем для мужчин [18–24]. Основной причиной в различиях оценок ОБЭ и коэффициентов дозового перехода для мужчин и женщин может быть некорректное предположение об исключительно мультипликативном взаимодействии между ингаляционным облучением радоном и курением.

Актуальность совершенствования методов оценки риска рака легкого с учетом взаимодействия курения, других факторов и облучения радоном связана с необходимостью построения прогноза изменения влияния облучения радоном в жилищах на заболеваемость раком легкого с учетом следующих предпосылок:

1. В последние 12–15 лет в России наблюдается устойчивая тенденция к увеличению ожидаемой средней продолжительности жизни (ОСПЖ). Так, по данным ВОЗ, ОСПЖ мужчин выросла с 2003 по 2015 г. с 58,7 до 65,3 лет. Аналогичный рост ОСПЖ женщин за этот же период составил с 71,9 до 76,5 лет [25] (более поздние детальные данные в статистике ВОЗ отсутствуют). Увеличение ожидаемой продолжительности жизни приводит к увеличению количества реализованных радиационно-индуцированных или обусловленных курением случаев рака легкого за счет увеличения вероятности дожития до возраста с максимальной вероятностью реализации онкозаболевания [7–9].

2. Россия является страной с высоким уровнем курения среди населения. Доля курящих мужчин в течение длительного периода (1994–2007 гг.) стабильно находилась на уровне ~60%. Доля курящих среди женщин за период 1994–2014 гг. выросла почти вдвое с ~7 до 15% [26–29]. Однако за последние годы наблюдается тенденция к снижению доли курящих [30, 31]. Сохранение этой тенденции должно привести в отдаленном будущем к снижению заболеваемости раком легкого как от курения, так и от воздействия радона.

3. Еще одной особенностью последних лет, характерной для российских мегаполисов, является устойчивая тенденция к повышению уровня энергоэффективности зданий. Требования по снижению теплопотерь предъявляются как к новым малоэтажным домам коттеджного типа, так и многоэтажным зданиям [32]. В большинстве случаев повышение энергоэффективности, среди прочих мер, производится за счет увеличения герметичности оболочки здания, что неизбежно приводит к уменьшению кратности воздухообмена. В современных энергоэффективных многоэтажных зданиях уровни объемной активности (ОА) радона значительно выше, чем в зданиях, построенных до 2000 г. При этом на первое место среди источников радона в помещениях выходит диффузионное выделение радона из строительных материалов [33–37]. С течением времени доля населения, проживающего в домах с возросшим уровнем ОА радона, будет неизбежно возрастать. Соответственно, риск возникновения радиационно-индуцированного рака легкого также будет увеличиваться.

4. Реконструкция и утепление домов, построенных в предыдущие годы, также приводит к росту ОА радона [32]. Например, замена устаревших деревянных оконных рам на пластиковые стеклопакеты привела к увеличению ОА радона в сельских одноэтажных домах в 1,4 раза [38].

Приведенные выше доводы показывают, что прогноз оценки вклада облучения ДПР радона в заболеваемость раком легкого в ближайшие и отдаленные периоды является задачей, требующей комплексного учета всех факторов, влияющих на возникновение данного заболевания.

Цель исследования – 1) совершенствование методов расчета риска рака легкого при облучении радоном в жилищах, с учетом комплексного характера взаимодействия ионизирующего излучения и курения при иницировании рака легкого; 2) прогнозная оценка влияния изменения ожидаемой продолжительности жизни, доли курящего населения и увеличения уровней ОА радона в современных зданиях на радиационно-индуцированную заболеваемость раком легкого в Российской Федерации.

Материалы и методы

Общий анализ радиационного риска при аддитивно-мультипликативном взаимодействии облучения ДПР радона и курения

Как уже упоминалось выше, мультипликативные модели возникновения радиационно-индуцированного рака легкого рассматривались как предпочтительные при оценке показателей радиационного риска [3–6]. Однако в докладе BEIR VI [3] анализировалась возможность сочетанного мультипликативно-аддитивного действия облучения ДПР радона на возникновение рака легкого. Более подробное развитие данная модель получила в работах Ладислава Томашека [39, 40]. В этих работах вместо мультипликативного взаимодействия ионизирующего излучения с курением представлена так называемая геометрическая смешанная модель (geometric mixture model) радиационного риска, в которой учитываются оба механизма воздействия ионизирующего излучения, как аддитивный, так и мультипликативный. Для оценки риска рака легкого у шахтеров была предложена следующая модель [39]:

$$R_{tot} = \lambda_{ns}(t) \times (RR_{sm} (1 + b_{5-19} W_{5-19} + b_{20+} W_{20+}))^{\theta} \times (RR_{sm} + b_{5-19} W_{5-19} + b_{20+} W_{20+})^{1-\theta}, \quad (1)$$

где R_{tot} – возраст-специфическая частота возникновения рака легкого, индуцированного радоном, $\lambda_{ns}(t)$ – спонтанная частота возникновения рака легкого в возрасте t для некурящих; RR_{sm} – относительный риск возникновения рака легкого вследствие курения; W_{5-19} and W_{20+} – кумулятивная экспозиция по ДПР радона в интервалы времени 5–19 и 20+ лет до наступления возраста t ; b_{5-19} and b_{20+} – коэффициенты пропорциональности; θ – параметр смешивания, варьирующий от 0 (аддитивная модель) до 1 (мультипликативная модель). Для оценки риска рака легкого от облучения радоном в жилищах в [40] было предложено использовать формулу:

$$R_{tot} = \lambda_{ns}(t) \cdot [RR_{sm} (1 + b_{Rn} C_{Rn})]^{\theta} \times (RR_{sm} + b_{Rn} C_{Rn})^{1-\theta}, \quad (2)$$

где C_{Rn} – объемная активность (ОА) радона в жилищах; b_{Rn} – коэффициент пропорциональности.

В работе [41] был проведен анализ применимости модели, описываемой уравнением (1), для оценки коэффициентов дозового перехода от экспозиции по ДПР радона к эффективной дозе. В отличие от работы [11], в которой рассматривались только мультипликативные модели риска при облучении радоном, при использовании геометрической смешанной модели различия в коэффициентах дозового перехода для мужчин и женщин отличались не более чем в 2 раза. В связи с этим представляют интерес оценки применимости геометрической смешанной модели, описываемой уравнением (2), для описания риска возникновения рака легкого при облучении в жилищах. Результаты, полученные в работе [41], позволяют надеяться, что применение данной модели позволит получить менее противоречивые результаты, чем использование мультипликативных моделей.

Моделирование возникновения рака легкого в популяции, на которую воздействуют такие факторы, как курение и радон, подробно описано в работах [42, 43]. Случайным образом генерировалась выборка значений ОА радона в моделируемой популяции. Было принято, что распреде-

ление ОА радона описывается логнормальным распределением, и при моделировании задавались значения среднего геометрического и стандартного отклонения σ_{LN} логарифмов ОА радона. Среднее геометрическое ОА радона задавалось в интервале от 25 до 100 Бк/м³, стандартное отклонение σ_{LN} — в интервале от 0,8 до 1,2. Как и в предыдущей работе [43], учитывалось, что значение ОА радона в жилищах у курильщиков в среднем на 10% ниже, чем в жилищах у некурящих. Всего было сгенерировано 8 выборок по 1 000 000 объектов в каждой с равной пропорцией мужчин и женщин. Подобный объем выборок позволял получить статистически достоверные результаты моделирования эпидемиологического исследования.

Было принято, что доминирующая заболеваемость раком легкого имеет место при возрасте, превышающем 40 лет [44]. В связи с этим моделирование ограничивалось расчетами для возрастов старше 40 лет. Возрастное распределение численности населения для $t \geq 40$ лет моделировалось спадающей функцией, соответствующей изменению вероятности дожития до определенного возраста. Категории курящих были выбраны, ориентируясь на распределения, приведенные в объединенном европейском исследовании [16, 45]: никогда не курившие (некурящие), курящие <15 сигарет в день (курящие 1), курящие 15–24 сигареты в день (курящие 2), курящие ≥ 25 сигарет в день (курящие 3), бросившие курить менее 10 лет (бросившие 1), бросившие курить более 10 лет (бросившие 2), курящие от случая к случаю, курящие только трубки или сигары (другие).

Для сопоставления полученных расчетных данных с ранее проведенным анализом [42] было принято, что для мужчин доля курящих либо когда-либо куривших составляет 60%, для женщин – 30% [46, 47]. Данное процентное распределение отличается от распределения, характерного для Российской Федерации [30, 31], и использовано для сопоставления с результатами наших предыдущих исследований [41, 42]. Частота спонтанного возникновения рака легкого для никогда не куривших в предположении о пренебрежимо малом влиянии других факторов риска (химических или радиационных) была рассчитана, исходя из данных о смертности от табакокурения в развитых странах, приведенных в работе [44].

Для курящих всех категорий методом случайных чисел был разыгран возраст начала курения, а для категории бросивших курить – и время прекращения курения. С целью оценки риска возникновения рака легкого, обусловленного курением, для всех членов моделируемых выборок был рассчитан индекс курения (пачка-лет, PY) как произведение количества выкуриваемых сигарет в день и стажа курения в годах, поделенное на 20.

Относительный риск возникновения рака легкого вследствие курения рассчитывался на основании анализа для европейских стран, приведенного в [15]. Для лиц, бросивших курить, снижение относительного риска возникновения рака легкого также оценивалось на основании данных [15] в виде спадающей экспоненциальной функции. Выражение для оценки относительного риска возникновения рака легкого вследствие курения имело вид:

$$RR_{sm} = (1 + PY \cdot k_{m,f}) \cdot \exp[-0.0685 \times (tsc)], \quad (3)$$

где PY – индекс курения, пачка-лет; $k_{m,f}$ – коэффициент пропорциональности между индексом курения и допол-

нительным относительным риском, для мужчин $k_m=0,740$, для женщин $k_f=0,395$ [15]; tsc – время с момента прекращения курения, лет.

При использовании возраст-специфической заболеваемости $\lambda_{ns}(t)$, как и в работе [41], были использованы данные по частоте спонтанного возникновения рака легкого для некурящих мужчин и женщин [44].

Расчет вероятности возникновения рака легкого, обусловленной сочетанным действием радона и курения, производился по формуле (2). При расчетах были использованы следующие параметры, взятые из оригинальной работы Томашека [40]: $q=0,3$; $b_{Rn}=0,00637$, Бк⁻¹×м³.

По отработанной ранее методике [42, 43] при помощи генератора случайных чисел разыгрывалось число (RANDOM), равномерно распределенное на интервале от 0 до 1. Если выполнялось условие $RANDOM \leq R_{tot}$, то считалось, что заболевание раком легкого реализовано, и рассматриваемый объект относился к основной группе. В противном случае он относился к контрольной группе. Для каждого объекта из основной группы было подобрано по 2 объекта в контрольной группе, стандартизованных по возрасту, статусу и продолжительности курения. Всего в основной группе было 9020 записей, а в контрольной группе – 18 019.

Для различных подгрупп в моделируемых выборках был проведен расчет отношения шансов (ОШ) по формуле:

$$OR = \frac{A/C}{B/D}, \quad (4)$$

где А – число членов основной группы, подвергшихся воздействию, В – число членов основной группы, не подвергшихся воздействию, С – число членов контрольной группы, подвергшихся воздействию, D – число членов контрольной группы, не подвергшихся воздействию. Зависимость ОШ от ОА радона представляется в виде:

$$OR(C_{Rn}) = 1 + \beta_{OR} \times (C_{Rn} - C_{Rn1}), \quad (5)$$

где C_{Rn} – значение ОА радона в анализируемой группе; C_{Rn1} – ОА радона в первой группе (группе сравнения) с минимальным значением ОА радона (группы В и D) [43]. Выбор границ группы сравнения и анализируемых групп был выполнен в соответствии с подходами, разработанными и описанными в [43]. При наличии совместно действующих факторов риска с различным характером влияния на возникновение рака легкого последствия воздействия каждого фактора по отдельности практически невозможно корректно оценить. Поэтому при анализе была использована детальная стратификация групп по уровню курения.

Прогнозная оценка риска возникновения рака легкого от облучения радоном для населения Российской Федерации

Для оценки показателей радиационного риска для населения Российской Федерации от облучения ДПР радона была использована описанная выше геометрическая смешанная модель радиационного риска [40]. Для оценки риска возникновения рака легкого, обусловленного курением, было рассмотрено несколько альтернативных моделей:

Модель 1, описываемая уравнением (3), в которой относительный риск обусловлен исключительно индексом курения PY (пачка-лет) и экспоненциальным уменьшением относительного риска при прекращении курения [15].

Модель 2, в которой относительный риск, обусловленный курением, определяется только интенсивностью курения [16].

Модель 3, в которой в качестве фактора, обуславливающего возникновение рака легкого в результате курения, используется совокупный показатель курения (cumulative smoking index, CSI) [23]:

$$RR_{sm} = 1 + (1 - 0.5^{dur/\tau}) (0.5^{tsc/\tau}) \ln(int + 1) \quad (6)$$

Таблица 1

Относительный риск возникновения рака легкого RR_{sm} в зависимости от интенсивности курения [16]

[Table 1]

The relative risk of lung cancer RR_{sm} , depending on the intensity of smoking [16]		
Интенсивность курения [Smoking intensity]	Мужчины [Males]	Женщины [Females]
Никогда не курившие (некурящие) [Non smokers]	1,0	1,0
Курят в настоящее время [Smokers]:		
< 15 сигарет в день (курящие 1) [< 15 cigarettes/day (smokers 1)]	13,2	5,8
15–24 сигареты в день (курящие 2) [15–24 cigarettes/day (smokers 2)]	25,8	11,4
≥ 25 сигарет в день (курящие 3) [≥ 25 cigarettes/day (smokers 3)]	39,5	17,4
Бросившие курить: [Ex-smokers]		
< 10 лет (бросившие 1) [ex-smokers 1]	20,8	5,5
≥ 10 лет (бросившие 2) [ex-smokers 2]	5,0	1,3
Курящие от случая к случаю, курящие только трубки или сигары (другие) [Smokers on a case-by-case basis, smoking only tubes or cigars (others)]	8,3	1,5

Достаточно высокий относительный риск для лиц, недавно бросивших курить, может объясняться тем, что причиной прекращения курения послужило наступившее ухудшение здоровья.

где dur – длительность курения, лет; tsc – время с момента прекращения курения, лет; int – интенсивность курения, сигарет в день; $t=26$ лет – период полууменьшения риска возникновения рака легкого при прекращении курения. При расчетах учитывалось, что для курящих параметры расчета dur и tsc должны быть уменьшены на минимальный латентный период $d=1,0$ лет для мужчин и $d=0,7$ лет для женщин.

Модель 4, в которой относительный риск возникновения рака легкого в результате курения описывается выражением:

$$RR_{sm} = 1 + \beta \cdot PY \cdot \exp(\varphi_1 \cdot \ln(int) + \varphi_2 \cdot (\ln(int))^2 + \gamma \cdot PY), \quad (7)$$

где $b=0,00499$, $\varphi_1=2,89$, $\varphi_2=-0,504$, $\gamma=0$ – коэффициенты пропорциональности, подобранные на основании анализа эпидемиологических данных [20]. Для учета снижения вероятности возникновения раковых заболеваний после прекращения курения при расчетах в уравнении (7) был использован дополнительный сомножитель $(0,5^{sc/t})$ [23].

С учетом того, что в Российской Федерации распределение численности населения по возрастам существенно отличается от равновесного распределения, которое наблюдается при гипотетических неизменных уровнях рождаемости и смертности, расчеты онкологических рисков проводились для реального распределения численности населения в 2009 и 2016 гг. [14].

Расчет рисков возникновения рака легкого для населения Российской Федерации при изменении процентного распределения курящих среди населения, ожидаемого изменения уровней ОА радона в жилищах за счет увеличения энергоэффективности зданий и увеличения ожидаемой средней продолжительности жизни проводился с использованием геометрической смешанной модели радиационного риска [40], 4 моделей возникновения рака легкого за счет курения [15, 16, 20, 23]. Данные по распределению доли курящих среди жителей России были взяты из результатов опросов [30, 31]. При прогнозных расчетах учитывалось, что часть активных курильщиков переходит в категорию «бросившие курить».

Как упоминалось ранее, расчеты заболеваемости раком легкого производились для населения в возрасте $t \geq 40$ лет. Для сопоставления результатов расче-

тов с данными медицинской статистики по Российской Федерации, представленной как количество заболеваний в год на 100 000 населения, учитывалось реальное возрастное распределение населения. При расчетах возрастного распределения были использованы реальные демографические данные по России (2009 и 2016 гг.). Для прогностических расчетов были использованы приближения, описывающие увеличение ожидаемой продолжительности жизни, а именно реальные распределения населения по возрастам для Чешской Республики за 2015 г. (выборка 2030) и распределение для Испании за 2015 г. (выборка 2050). Выбор Чехии в качестве модельного распределения был обусловлен большей, чем в России, но не максимальной ожидаемой продолжительностью жизни. Испания была выбрана как одна из стран с максимальной продолжительностью жизни. Для оценки риска в 2100 г. (люди, родившиеся в 2020 г., никогда не курившие и живущие в обществе с высоким уровнем здравоохранения) была сформирована выборка, в которой смертность от сердечно-сосудистых, онкологических, инфекционных заболеваний, заболеваний респираторного тракта и смертность от внешних причин (ДТП, несчастные случаи и т.д.) в четыре раза меньше, чем для населения Испании за 2015 г.

Расчеты были выполнены для ОА радона в диапазоне от значений 5 Бк/м³, соответствующих средним значениям ОА радона в атмосферном воздухе [48], до значений, оцениваемых как ожидаемые максимальные средние значения для энергоэффективных зданий в различных регионах Российской Федерации [33–36, 49, 50]. Распределение ОА радона моделировалось логнормальным распределением с различными значениями среднего геометрического при стандартном отклонении $\sigma_{LN}=1,0$ (стандартное геометрическое отклонение СГО=2,72).

Результаты и обсуждение

Общий анализ радиационного риска при аддитивно-мультипликативном взаимодействии облучения ДПР радона и курения

Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Представленные в таблице 2 данные показывают, что зависимость ОШ от ОА радона, полученная при анализе

Таблица 2

Расчет зависимости ОШ от ОА радона (β_{OR}) для различных моделируемых подгрупп при аддитивно-мультипликативном взаимодействии облучения ДПР радона и курения

[Table 2]

Dependency of the odds ratios on the indoor radon concentrations (β_{OR}) for different model groups under additive-multiplicative interaction of radon progeny exposure and smoking]

Подгруппа [Group]	Количество случаев [Number of Cases]	Количество контролей [Number of Controls]	β_{OR} на 100 Бк/м ³ [β_{OR} per 100 Bq/m ³]
Объединенная выборка [Combined sample]	9020	18019	0,157 (0,143–0,172)*
Мужчины [males]	6456	12904	0,119 (0,012–0,138)
Женщины [females]	2564	5145	0,265 (0,238–0,294)
Некурящие [non-smokers]	922	1844	0,652 (0,603–0,710)
Курящие < 15 сигарет/день [smokers < 15 cigarettes/day]	2254	4505	0,172 (0,117–0,243)
Курящие 15–24 сигарет/день [smokers 15–24 cigarettes/day]	1840	3677	0,115 (0,082–0,155)

Подгруппа [Group]	Количество случаев [Number of Cases]	Количество контролей [Number of Controls]	β_{OR} на 100 Бк/м ³ [β_{OR} per 100 Bq/m ³]
Курящие ≥ 25 сигарет/день [smokers ≥ 25 cigarettes/day]	1785	3588	0,094 (0,066–0,128)
Все бросившие курить [ex-smokers]	1575	3148	0,141 (0,113–0,178)

* Приведены 90% доверительные интервалы [* 90% confidence intervals are given].

объединенной выборки, фактически совпала со значением $\beta_{OR}=0,16$ на 100 Бк/м³, полученным в Объединенном европейском исследовании [16, 43], хотя при моделировании были использованы модель риска и коэффициенты из работы Томашека [40].

Для отдельных подгрупп значения β_{OR} отличаются, и в ряде случаев значительно. Наиболее высокое значение коэффициента β_{OR} наблюдается для подгруппы некурящих. Вклад некурящих в основную группу с диагнозом рак легкого составил 10,2%. В пределах статистического разброса его значение совпадает со значением $b_{Rn}=0,00637$, Бк⁻¹×м³, используемым при моделировании. Если учесть, что в уравнении (2) для некурящих $RR_{sm}=1$, то выражение для расчета риска при воздействии ДПР радона примет вид:

$$R_{tot} = \lambda_{ns}(t) \cdot [RR_{sm}(1 + b_{Rn} C_{Rn})]^0 \times (RR_{sm} + b_{Rn} C_{Rn})^{1-0} = \lambda_{ns}(t) \times (1 + b_{Rn} C_{Rn}), \quad (8)$$

что соответствует полученным результатам моделирования.

Прогнозная оценка риска рака легкого для населения Российской Федерации при облучении радона

Результаты расчетов рисков возникновения рака легкого для населения Российской Федерации при изменении социально-экономических условий (снижения доли курящих среди населения, изменения уровней ОА радона в жилищах за счет увеличения энергоэффективности зданий и увеличения ОСПЖ) представлены в таблице 3.

Как видно из таблицы 3, снижение доли курящего населения приводит к снижению заболеваемости раком легкого. Для 2009 г. средние расчетные уровни заболеваемости раком легкого составили для мужчин 80,3, для женщин 23,3 случая на 100 000 населения при среднем значении ОА радона 50 Бк/м³. Для прогнозов на 2030 и 2050 гг. ожидаемые уровни заболеваемости составили для мужчин 77,0 и 48,7, а для женщин 34,4 и 24,5 случая на 100 000 населения соответственно при тех же уровнях ОА радона.

Изменение процентного вклада рака легкого в общую смертность населения для различных периодов представлено в таблице 4.

Таблица 3

Расчеты заболеваемости раком легкого для населения Российской Федерации при изменении социально-экономических условий

[Table 3]

Estimates of lung cancer incidence rate for the Russian Federation population under changing socio-economic conditions

Популяция [Population]	Среднее значение ОА радона, Бк/м ³ [Average radon concentration, Bq/m ³]	Доля никогда не курившего населения, % [Percentage of never-smokers]	ОСПЖ, лет, [life expectancy, years]	Заболеваемость на 100 000 населения в год (среднее по четырем моделям) [incidence rate per 100,000 of population per year (average of four models)]	
				М/М	Ж/Ф
Население РФ на 2009 г. [Russian population 2009]	~0			74,0	20,4
	20			76,4	21,3
	30			77,6	22,0
	50	21,7 (М/М) 83,8* (Ж/Ф)	62,0 73,9	80,3	23,3
	75			83,3	24,8
	100			86,2	26,4
	150			91,9	29,5

Популяция [Population]	Среднее значение ОА радона, Бк/м ³ [Average radon con- centration, Bq/m ³]	Доля никогда не курившего населения, % [Percentage of never-smokers]	ОСПЖ, лет, [life expec- tancy, years]	Заболеваемость на 100 000 населения в год (среднее по четырем моделям) [incidence rate per 100,000 of population per year (average of four models)]	
				М/М	Ж/Ф
Население РФ на 2016 г. [Russian population 2016]	~0	25,7 (М/М) 83,8* (Ж/Ф)	65,1 75,9	76,8	21,2
	20			79,3	22,8
	30			80,5	23,5
	50			83,4	24,8
	75			86,9	26,8
	100			89,9	28,4
	150			95,5	31,6
Прогноз для населения РФ на 2030 г. [Russian population 2030 prognosis]	~0	36,2 (М/М) 70,2 (Ж/Ф)	74,8 80,6	70,7	30,5
	20			73,1	32,0
	30			74,5	32,7
	50			77,0	34,4
	75			80,3	36,5
	100			83,5	38,6
	150			89,0	42,5
Прогноз для населения РФ на 2050 г. [Russian population 2050 prognosis]	~0	68,1 (М/М) 84,9 (Ж/Ф)	78,9 84,4	43,9	21,2
	20			45,6	22,3
	30			46,6	23,2
	50			48,7	24,5
	75			51,0	26,5
	100			53,4	28,1
	150			57,8	31,7

Окончание таблицы 3

Популяция [Population]	Среднее значение ОА радона, Бк/м ³ [Average radon con- centration, Bq/m ³]	Доля никогда не курившего населения, % [Percentage of never-smokers]	ОСПЖ, лет, [life expec- tancy, years]	Заболеваемость на 100 000 населения в год (среднее по четырем моделям) [incidence rate per 100,000 of population per year (average of four models)]	
				М/М	Ж/Ф
Прогноз для населения РФ на 2100 г. [Russian population 2100 prognosis]	~0			12,1	12,4
	20			13,2	13,6
	30			14,0	14,4
	50	100 (М/М) 100 (Ж/Ф)	88,0 90,9	15,5	15,9
	75			17,4	17,8
	100			19,3	19,8
	150			23,0	23,5

* С учетом того, что средний латентный период возникновения рака легкого составляет ~20–25 лет [3–5, 8, 9], при расчетах заболеваемости на 2009 и 2016 гг. для женщин были использованы данные по интенсивности курения на 1990–1999 гг. [* – taking into account that the average latency period for the lung cancer is ~20–25 years [3–5, 8, 9], when calculating the incidence for 2009 and 2016. for women, data on smoking prevalence for 1990–1999 were used].

Как видно из таблицы 3, вклад радона в заболеваемость раком легкого в абсолютных цифрах практически не зависит от увеличения продолжительности жизни и

снижения уровня курения. Так, в прогнозах 2009–2030 гг. вклад радона при ОА радона 50 Бк/м³ в заболеваемость составляет для мужчин и женщин 6,2–6,4 и 2,9–3,9 случа-

Таблица 4

Относительный вклад облучения радоном в общую смертность населения в различные временные периоды

[Table 4]

Relative contribution of radon exposure to total mortality of the population at different time periods

Популяция [Population]	Общая смертность на 100 000 населения [Total mortality per 100,000 population]		Дополнительная смертность от рака легкого при ОА радона 50 Бк/м ³ [Additional lung cancer mortal- ity at radon concentration of 50 Bq/m ³]		Вклад радона*, % [Radon contribution*, %]	
	М/М	Ж/Ф	М/М	Ж/Ф	М/М	Ж/Ф
Население РФ на 2009 г. [Russian population 2009]	1367	1463	6,2	2,9	0,46	0,20
Население РФ на 2016 г. [Russian population 2016]	1417	1200	6,6	3,6	0,47	0,30
Прогноз для населения РФ на 2030 г. [Russian population 2030 prognosis]	1080	1030	6,4	3,9	0,59	0,37
Прогноз для населения РФ на 2050 г. [Russian population 2050 prognosis]	936	886	4,8	3,3	0,52	0,37
Прогноз для населения РФ на 2100 г. [Russian population 2100 prognosis]	389	429	3,4	3,5	0,87	0,81

*Принят коэффициент летальности, равный 1 [*lethality coefficient equal to 1 is assumed].

ев на 100 000 населения соответственно. При этом прогнозируемая заболеваемость раком легкого для женщин к 2030 г. вырастет по сравнению с 2009–2016 гг., потому что женщины, ставшие более активно курить в 1990–2000-е гг., войдут в возраст реализации индуцированного совместным действием курения и радона рака легкого. Лишь для ситуации, когда основная часть населения бросила курить, а ожидаемая продолжительность жизни достигла уровней, характерных для стран, лидирующих по этому показателю (прогноз на 2050 г.), ожидаемый абсолютный уровень заболеваемости раком легкого, обусловленной радоном, будет снижаться для мужчин и женщин до уровней 4,8 и 3,3 случаев соответственно на 100 000 населения в год при ОА радона 50 Бк/м³. Как видно из таблицы 4, при переходе к наиболее благоприятному сценарию, который представляет собой прогноз для 2100 г., вклад радона в общую смертность по сравнению с ситуацией 2009 г. увеличится в 1,9 и 4,0 раза для мужчин и женщин соответственно.

Расчеты показателей радиационного риска при использовании предположения об аддитивно-мультипликативном взаимодействии облучения ДПР радона и курения показали, что относительный риск возникновения радиационно-индуцированного рака легкого для некурящих в несколько раз выше, чем для курящих. Данный результат соответствует выводам исследования BEIR VI, выполненного для шахтеров урановых рудников [3], позднее поддержанным в публикации Агентства по охране окружающей среды США [9]. Согласно этим публикациям, относительный риск для некурящих при облучении радоном в два раза выше, чем для курящих. По-видимому, наблюдаемое различие в относительном риске между курящими и некурящими можно объяснить аддитивно-мультипликативным взаимодействием ДПР радона и курения при инициировании рака легкого. При этом не исключено действие на шахтеров и иных факторов риска, влияющих на возникновение рака легкого (пыль, дизельные выхлопные газы, мышьяк и др.).

Для групп мужчин и женщин наблюдаемые различия в значениях β_{OR} (см. табл. 2) обусловлены различной долей курящих в этих группах. Зависимость ОШ от ОА радона в группах с различной интенсивностью курения демонстрирует тенденцию к снижению коэффициента β_{OR} по мере увеличения интенсивности курения. Снижение наблюдаемого значения наклона зависимости ОШ от ОА радона является характерным при наличии дополнительного фактора риска, воздействующего по аддитивному механизму [43].

Для обоснования применения геометрической смешанной аддитивно-мультипликативной модели для моделирования риска возникновения рака легкого при сочетании действия радона и курения является принципиально важным, что эта модель позволяет получить оценки риска возникновения рака легкого, хорошо согласующиеся с результатами Объединенного европейского исследования [16, 45].

Анализ прогнозных оценок риска рака легкого для населения Российской Федерации при облучении радоном, приведенных в таблице 2, показывает, что расчетные данные по заболеваемости раком легкого несколько отличаются и от реальных данных медицинской статистики за 2009 и 2016 гг. [51]. Для мужчин заболеваемость в эти

годы составляла 71,1 и 70,7, а для женщин 13,6 и 15,8 случаев в год на 100 000 населения соответственно. Если для мужчин усредненное по различным моделям расчетное значение заболеваемости лежит близко к наблюдаемым значениям, то для женщин расчет дает величину, превышающую реальные эпидемиологические данные. Данное расхождение может быть объяснено сложностями переноса параметров моделей риска, полученных на одной популяции, на популяцию другой страны. Вместе с тем, проведенные расчеты позволяют сделать оценку тенденций при постепенном снижении уровня потребления табака, росте ОСПЖ и потенциальном увеличении ОА радона в жилищах за счет перехода на энергосберегающие технологии в строительстве.

В предположении, что среднее значение ОА радона в России в настоящее время, округленное с учетом всех типов зданий, составляет 50 Бк/м³ [49], абсолютное количество случаев рака легкого за 2015 г., в соответствии с нашими расчетами, обусловленное воздействием радона (см. табл. 3), составит для мужчин ~4500, а для женщин ~2800 случаев. Для сравнения можно привести количество смертей в этом же году от туберкулеза – 10584 и 2788, гепатита – 1060 и 705, ВИЧ – 10650 и 4837 (в 2009 г. 4164 и 1469) случаев для мужчин и женщин соответственно [25]. Очевидно, что радон является одним из существенных факторов риска для человека. Это нашло свое отражение в большом аналитическом обзоре, опубликованном в журнале The Lancet [52], в котором радон – единственный из радиационных факторов, включенный в перечень факторов риска, значимых для человека.

Если не рассматривать идеализированную ситуацию популяции, никогда не знавшей, что такое курение («Прогноз для населения РФ на 2100 год»), то уровни радона, характерные в настоящий момент для большинства крупных мегаполисов РФ (ОА радона 20–40 Бк/м³ [50]), обуславливают вклад радона в общую смертность на уровне менее 0,5% и 0,3% для мужчин и женщин соответственно. При таком достаточно низком уровне риска основной мерой оптимизации радиационной безопасности при облучении радоном в многоквартирных зданиях может являться контроль сохранения достигнутого уровня защиты от радона.

Повышение среднего уровня ОА радона, которое может быть связано с дальнейшим распространением энергоэффективных технологий строительства при возведении как малоэтажных, так и многоэтажных зданий, приведет к пропорциональному изменению риска. Например, при увеличении среднего уровня ОА радона до 100 Бк/м³, с учетом изменения распространенности курения и изменения ОСПЖ, дополнительное количество случаев раков легкого вырастет в 1,4 и 1,9 раза для мужчин и женщин по сравнению с 2016 г. (см. табл. 3, строка «Прогноз для населения РФ на 2050 год»).

Влияние радона на заболеваемость раком легкого при изменении демографической ситуации иллюстрируется изменением процентного вклада рака легкого в общую смертность населения для различных периодов (см. табл. 4). Сопоставление расчетов, выполненных для различных временных периодов, показывает, что ключевым фактором, влияющим на заболеваемость раком легкого, остается курение. Даже для относительно отдаленных прогнозов на 2050 г., когда доля активно куря-

щего населения должна снизиться, ситуация с вкладом радона в заболеваемость раком легкого и общую смертность остается практически неизменной или меняющейся очень слабо (рис.).

Более высокие значения вклада радона в заболеваемость для мужчин в период 2009–2050 гг. связаны с тем, что при аддитивно-мультипликативном характере взаимодействия радона и курения сказывается более высокое значение частоты спонтанных раков легкого у мужчин (продолжающих курить или бросивших 20–30 лет назад).

Для гипотетической ситуации прогноза 2100 г., когда все население полностью является некурящим и никогда не курившим, а ОСПЖ существенно возросла, количество случаев радиационно-индуцированного рака легкого составит 3,4–3,5 случаев на 100 000 населения в год при ОА радона 50 Бк/м³ (см. табл. 3). Величина ДОР возникновения радиационно-индуцированного рака легкого заметно (в 1,9–4 раза) увеличивается только для этого идеализированного прогноза (см. рис.). Если предположить, что средний уровень облучения радоном населения к этому периоду вырастет за счет широкого применения энергоэффективных технологий, то дополнительное количество случаев раков легкого в идеализированной ситуации вырастет в 4–9 раз по сравнению с 2009 г. и будет достигать 2% от общей смертности.

Если оценивать ситуацию более реалистично, то вклад курения в возникновение рака легкого будет оставаться основным фактором риска еще достаточно продолжительное и неопределенное время. Даже если все население страны одномоментно прекратит курить, спад в заболеваемости раком легкого можно будет наблюдать спустя значительный интервал времени, обусловленный латентным периодом развития рака и постепенным переходом ныне курящих относительно молодых людей в возрастную категорию с высокой частотой спонтанного возникновения рака легкого.

Заключение

По результатам данной работы можно сделать следующие выводы:

1. На основании результатов расчетов, выполненных в [10, 11], выдвинута гипотеза о том, что использование при расчетах показателей радиационного риска при облучении радоном моделей, полученных на основе эпидемиологических данных по заболеваемости раком легкого шахтеров урановых рудников, приводит к неверным оценкам риска для категорий с низкой частотой спонтанного возникновения рака легкого (женщины, некурящие и др.). Причиной отклонения является отличие реального канцерогенеза от теоретически предсказанного мультипликативного при сочетанном воздействии радона и курения.

2. Продemonстрировано, что моделирование риска возникновения рака легкого при сочетанном действии радона и курения с использованием геометрической смешанной аддитивно-мультипликативной модели дает оценки ДОР, которые полностью соответствуют результатам Объединенного европейского радонового эпидемиологического исследования.

3. Результаты модельных расчетов с применением геометрической смешанной модели в зависимости от статуса курения согласуются с данными эпидемиологического исследования BEIR VI, выполненного для шахтеров урановых рудников [3], и публикации Агентства по охране окружающей среды США [9].

4. Прогнозная оценка риска рака легкого для населения Российской Федерации при облучении радоном показала, что расчетное значение заболеваемости, усредненное по различным моделям возникновения рака легкого при курении, для мужчин лежит близко к наблюдаемым значениям, но для женщин расчет дает величину, превышающую реальные эпидемиологические данные. Это обусловлено сложностями переноса параметров моделей риска, полученных на одной популяции, на популяцию другой страны (отличающиеся марки табачных изделий, привычек курения и др.).

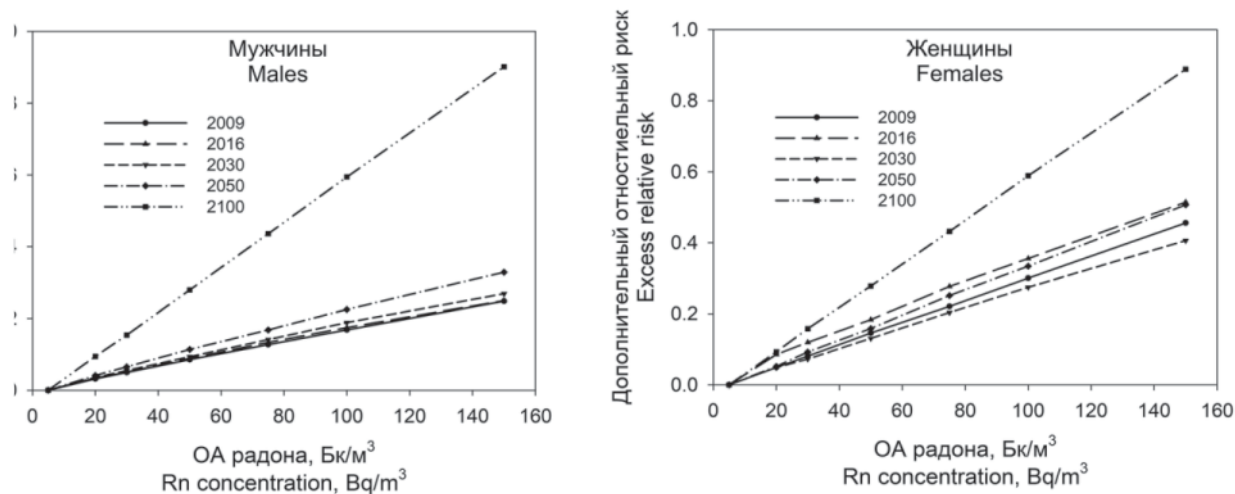


Рис. Зависимость дополнительного относительного риска от ОА радона для различных временных периодов
[Fig. Dependence of excess relative risk on radon concentration for different time periods]

5. Снижение доли курящего населения приводит к значительному снижению заболеваемости раком легкого. Однако общее увеличение ОСПЖ приводит к росту реализуемой заболеваемости раком легкого, что отчасти нивелирует эффективность антитабачных мер.

6. В абсолютных цифрах вклад радона в заболеваемость раком легкого слабо зависит от увеличения продолжительности жизни и снижения уровня курения в силу противоположного характера их влияния на данный процесс. Лишь для популяции, в которой отсутствуют курящие или ранее курившие, возможно существенное, до двух раз, снижение количества радиационно-индуцированных случаев рака легкого для мужчин. Для женщин абсолютная величина количества случаев рака легкого, обусловленного радоном, остается практически неизменной. При этом ДОР возникновения радиационно-индуцированного рака легкого на 100 Бк/м³ будет постепенно увеличиваться по мере снижения уровня заболеваемости раком легкого, обусловленного курением.

7. Проведенный анализ показывает, что при снижении уровня потребления табака и увеличении ожидаемой продолжительности жизни радон будет оставаться глобальным фактором риска. Реализация наиболее благоприятного социально-экономического сценария развития общества, при котором за счет отказа от вредных привычек, в том числе полного отказа от курения, и приверженности здоровому образу жизни, произойдет существенное увеличение ОСПЖ, вклад облучения радоном в структуру причин смерти увеличится. Более того, сохранение тенденции повышения энергоэффективности зданий за счет снижения воздухообмена приведет к многократному повышению вклада радона в общую смертность.

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

Литература

1. National Research Council. Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase 2. Washington, DC: The National Academies Press; 2006. 422 pp.
2. UNSCEAR Report 2006. Appendix A. Epidemiological studies of radiation and cancer. UNSCEAR; 2006. 392 pp.
3. National Research Council. Health Risks of Exposure to Radon: BEIR VI. Washington, DC: The National Academies Press; 1999. 592 pp.
4. Grosche B., Kreuzer M., Kreischer M., et al. Lung cancer risk among German male uranium miners: a cohort study, 1946–1998 // *British Journal of Cancer*. 2006. Vol. 95, P. 1280–1287. DOI: 10.1038/sj.bjc.6603403.
5. Tomasek L., Roge A., Tirmarche M., et al. Lung Cancer in French and Czech Uranium Miners: Radon-Associated Risk at Low Exposure Rates and Modifying Effects of Time since Exposure and Age at Exposure // *Radiation Research*. 2008. Vol. 169, N 2. P. 125–137. DOI: 10.1667/RR0848.1.
6. Tomasek L. Effect of age at exposure in 11 underground miners studies // *Radiation Protection Dosimetry*. 2014. Vol. 160, N 1–3. P. 120–123. DOI: 10.1093/rpd/ncu068.
7. Рекомендации Международной комиссии по радиологической защите 1990 года. Публикация 60 МКРЗ. М.: Энергоатомиздат, 1994. Ч.2.
8. EPA Radiogenic Cancer Risk Models and Projections for the U.S. Population. // U.S. Environmental Protection Agency. Report EPA 402-R-11-001; 2011. P. 175. URL: http://www.philrutherford.com/Radiation_Risk/EPA-402-R-11-001.pdf. (Дата обращения 16.11.2020).
9. EPA assessment of risks from radon in homes. Report EPA 402-R-03-003, US Environmental Protection Agency, Washington; 2003. P. 98. URL: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-05/documents/402-r-03-003.pdf>. (Дата обращения 16.11.2020).
10. Zhukovsky M., Bastrikova N., Vasilyev A. Relative biological effectiveness of alpha particles at radon exposure // *Radiation Protection Dosimetry*. 2015. V.164, N 4. P. 467–470. DOI: 10.1093/rpd/ncv334.
11. Zhukovsky M., Yarmoshenko I. Radon Exposure and Dose Calculation: Problems of Choice. Proc. Third Int. Conf. on Radiation and Applications in Various Fields of Research. Budva, Montenegro; 2015. P. 343–348.
12. ICRP. International Commission on Radiological Protection. Protection against Radon-222 at Home and at Work. ICRP Publication 65 // *Annals of the ICRP*. 1993. Vol. 23. No 2.
13. ICRP. International Commission on Radiological Protection. Occupational intakes of radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. *Annals of the ICRP*. 2017. Vol. 46, N 3–4.
14. WHO Mortality Database. World Health Organization. 2020. URL: https://www.who.int/healthinfo/mortality_data/en/. (Дата обращения 16.11.2020).
15. Simonato L., Agudo A., Ahrens, W. et al. Lung cancer and cigarette smoking in Europe: An update of risk estimates and an assessment of inter-country heterogeneity // *International Journal of Cancer*. 2001. Vol. 91. P. 876–887. DOI: 10.1002/1097-0215(200102)9999:9999::aid-ijc1139>3.0.co;2-7.
16. Darby S., Hill D., Auvinen A., et al. Residential radon and lung cancer: detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 subjects with lung cancer and 14208 subjects without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe // *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*. 2006. Vol. 32, Suppl. 1. P. 1–83.
17. Yu Y., Liu H., Zheng S., et al. Gender susceptibility for cigarette smoking-attributable lung cancer: A systematic review and meta-analysis // *Lung Cancer*. 2014. Vol. 85. P. 351–360. DOI: 10.1016/j.lungcan.2014.07.004.
18. Kreuzer M., Boffetta P., Whitley E. et al. Gender differences in lung cancer risk by smoking: a multicentre case-control study in Germany and Italy // *British Journal of Cancer*. 2000. Vol. 82, No 1. P. 227–233. DOI: 10.1054/bjoc.1999.0904.
19. Ando M., Wakai K., Seki N., et al. Attributable and absolute risk of lung cancer death by smoking status: findings from the Japan collaborative cohort study // *International Journal of Cancer*. 2003. Vol. 105. P. 249–254. DOI: 10.1002/ijc.11043.
20. Lubin J.H., Caporaso N.E. Cigarette Smoking and Lung Cancer: Modeling Total Exposure and Intensity // *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev*. 2006. Vol. 15, No 3. P. 517–523. DOI: 10.1158/1055-9965.EPI-05-0863.
21. Powell H.A., Iyen-Omofoman B., Hubbard R.B., et al. The Association Between Smoking Quantity and Lung Cancer in Men and Women // *Chest*. 2013. Vol. 143, No 1. P. 123–129. DOI: 10.1378/chest.12-1068.
22. Papadopoulos A., Guida F., Leffondre K., et al. Heavy smoking and lung cancer: Are women at higher risk? Result of the ICARE study // *British Journal of Cancer*. 2014. Vol. 110. P. 1385–1391. DOI: 10.1038/bjc.2013.821.
23. Remen T., Pintos J., Abrahamowicz M., Siemiatycki J. Risk of lung cancer in relation to various metrics of smoking history: a case-control study in Montreal // *BMC Cancer*. 2018. Vol. 18. Article number 1275. DOI: 10.1186/s12885-018-5144-5.
24. Yarmoshenko I.V., Malinovsky G.P. Combined analysis of on-to-epidemiological studies of the relationship between lung cancer and indoor radon exposure // *NUKLEONIKA*. 2020. Vol. 65. P. 83–88. DOI: 10.2478/nuka-2020-0012.
25. European Health Information Gateway. Health for All Explorer. World Health Organization. URL: <https://gateway.euro.who.int/en/hfa-explorer>. (Дата обращения 16.11.2020).

26. Perlman F., Bobak M., Gilmore A., McKee M. Trends in the prevalence of smoking in Russia during the transition to a market economy // *Tobacco Control*. 2007. Vol. 16. P. 299–305. DOI: 10.1136/tc.2006.019455.
27. Красовский К.С. Распространенность курения среди взрослых в Российской Федерации // *Tobacco Control and Public Health in Eastern Europe*. 2011. Vol. 1, No 1. P. 61–63.
28. Herzfeld T., Huffman S., Rizov M. The dynamics of food, alcohol and cigarette consumption in Russia during transition // *Economics & Human Biology*. 2014, Vol. 13. P. 128–143. DOI: 10.1016/j.ehb.2013.02.002.
29. Quirmbach D., Gerry C.J. Gender, education and Russia's tobacco epidemic: A life-course approach // *Social Science & Medicine*. 2016. Vol. 160. P. 54–66. DOI: j.socscimed.2016.05.008
30. Глобальный опрос взрослого населения о потреблении табака (GATS), Российская Федерация, 2009 г. Страновой отчет. URL: https://www.who.int/tobacco/surveillance/ru_tfi_gatsrussian_countryreport.pdf. (Дата обращения 16.11.2020).
31. Глобальный опрос взрослого населения о потреблении табака: Краткий обзор, 2016 г. URL: https://static-1.rosminzdrav.ru/system/attachments/attaches/000/036/485/original/GATS-краткий_отчет-рус.pdf?1511269867. (Дата обращения 16.11.2020).
32. Ярмошенко И.В., Малиновский Г.П., Онищенко А.Д., Васильев А.В. Проблема облучения радоном в зданиях повышенного класса энергоэффективности // *Радиационная гигиена*. 2019. Т. 12, № 4. С. 56–65. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-56-65
33. Васильев А.В., Жуковский М.В., Онищенко А.Д., Вишневский А.А. Строительные материалы как источник радона в зданиях, построенных по современным технологиям // *Строительные материалы*. 2013. № 4. С. 104–107.
34. Yarmoshenko I.V., Vasilyev A.V., Onishchenko A.D., et al. Indoor radon problem in energy efficient multi-storey buildings // *Radiation Protection Dosimetry*. 2014. Vol. 160, No 1–3. P. 53–56. DOI: 10.1093/rpd/ncu110.
35. Vasilyev A.V., Yarmoshenko I.V., Zhukovsky M.V. Low air exchange rate causes high indoor radon concentration in energy-efficient buildings // *Radiation Protection Dosimetry*. 2015. Vol. 164, No 4. P. 601–605. DOI: 10.1093/rpd/ncv319.
36. Васильев А.В., Ярмошенко И.В., Жуковский М.В. Радоновая безопасность современных многоэтажных зданий различных классов энергетической эффективности // *Радиационная гигиена*. 2018. Т. 11, № 1. С. 80–84. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-1-80-84.
37. Yarmoshenko I., Zhukovsky M., Onishchenko A., et al. Factors influencing temporal variations of radon concentration in high-rise buildings // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021. No 232. P. 106575.
38. Yarmoshenko I., Malinovsky G., Vasilyev A., et al. Geogenic and anthropogenic impacts on indoor radon in the Tcha River region. *Science of the Total Environment*. 2016. No 571. P. 1298–303. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.170
39. Tomasek L. Interaction of radon and smoking among Czech uranium miners. *Radiation Protection Dosimetry*. 2011. Vol. 145, No 2–3. P. 238–242. DOI: 10.1093/rpd/ncr048.
40. Tomasek L. Lung Cancer Risk from Occupational and Environmental Radon and Role of Smoking in Two Czech Nested Case-Control Studies // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2013. Vol. 10. P. 963–979. DOI: 10.3390/ijerph10030963
41. Zhukovsky M., Onishchenko A. Calculation of Dose Conversion Factors Based on the Results of Geometric Mixture Models for Risk Assessment of Radon Exposure. *Radiation Protection Dosimetry*. 2020. Vol. 191, No 2. P. 181–187. DOI: 10.1093/rpd/ncaa145.
42. Онищенко А., Жуковский М.В. Роль искажающих факторов в радоновом эпидемиологическом исследовании // *Радиационная гигиена*. 2017. Т. 10, № 1. С. 65–75. DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-1-65-75
43. Онищенко А.Д., Вараксин А.Н., Жуковский М.В. Анализ подходов к формированию контрольной группы в радоновых эпидемиологических исследованиях по типу случай-контроль // *Радиационная гигиена*. 2017. Т. 10, № 3. С. 76–89. DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-3-76-89.
44. Peto R., Lopez A., Boreham J., et al. Mortality from tobacco in developed countries: indirect estimation from national vital statistics // *Lancet*. 1992. Vol. 339. P. 1268–1278. DOI: 10.1016/0140-6736(92)91600-d.
45. Darby S., Hill D., Auvinen A., et al. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies // *British Medical Journal*. 2005. Vol. 330. P. 223–227. DOI: 10.1136/bmj.38308.477650.63.
46. Graham H. Smoking prevalence among women in the European community 1950–1990 // *Social Science & Medicine*. 1996. Vol. 43, No 2. P. 243–254. DOI: 10.1016/0277-9536(95)00369-x.
47. Zato ski W., Przewo niak K., Sulkowska U., et al. Tobacco smoking in countries of the European Union // *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*. 2012. Vol. 19, No 2. P. 181–192.
48. Cinelli G., De Cort M., Tollefsen T. European Atlas of Natural Radiation, Publications Office of the European Union, Luxembourg. 2019. URL: <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/european-atlas-natural-radiation-0>. (Дата обращения 16.11.2020).
49. Yarmoshenko I., Malinovsky G., Vasilyev A., Zhukovsky M. Reconstruction of national distribution of indoor radon concentration in Russia using results of regional indoor radon measurement programs // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2015. Vol. 150. P. 99–103. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2015.08.007.
50. Yarmoshenko I.V., Onishchenko A.D., Malinovsky G.P., et al. Radon concentration in conventional and new energy efficient multi-storey apartment houses: results of survey in four Russian cities // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. Article number 18136. DOI: 10.1038/s41598-020-75274-4.
51. Каприн А.Д., Старинский В.В., Петрова Г.В. Злокачественные новообразования в России в 2018 году (заболеваемость и смертность). М.: МНИОИ им. П. А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России. 2019. 250 с.
52. Global, regional, and national comparative risk assessment of 84 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks, 1990–2016: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016 // *Lancet*. 2017. Vol. 390. P. 1345–1422. DOI: 10.1016/S0140-6736(17)32366-8.

Поступила: 21.05.2021 г.

Жуковский Михаил Владимирович – доктор технических наук, профессор, директор, главный научный сотрудник Института промышленной экологии Уральского отделения Российской Академии наук, Екатеринбург, Россия

Ярмошенко Илья Владимирович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заместитель Института промышленной экологии Уральского отделения Российской Академии наук, Екатеринбург, Россия

Онищенко Александра Дмитриевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института промышленной экологии Уральского отделения Российской Академии наук, Екатеринбург, Россия

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

Для цитирования: Жуковский М.В., Ярмошенко И.В., Онищенко А.Д., Малиновский Г.П. Прогностическая оценка риска рака легкого при сочетанном действии радона и курения с использованием аддитивно-мультипликативной модели риска // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 3. С.41-55. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-41-55

Prognostic assessment of lung cancer risk under combined action of radon and smoking using an additive-multiplicative risk model

Mikhail V. Zhukovsky, Ilya V. Yarmoshenko, Aleksandra D. Onishchenko, Georgy P. Malinovsky

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

An application of geometric mixed additive-multiplicative models for lung cancer risk modeling under combined action of radon and smoking is justified in this paper. The geometric mixed model allows: 1) to reduce the discrepancies between estimates of the lung cancer risk for males and females, 2) to predict the population risk under condition of the varying smoking prevalence and changing average indoor radon concentration level. Using the geometric mixed model, the calculation of the lung cancer risks for the Russian Federation population was carried out for different percentages of smokers among the population, an increase in life expectancy, and a change in the average radon concentration level in residential buildings. Assuming that currently rounded average indoor radon concentration in Russia is 50 Bq/m³, the contribution of radon to total mortality in 2009 was 0.46% and 0.20% for male and female, respectively. Modeling has shown that the effect of lung cancer mortality reducing due to the predicted decrease in the proportion of smoking population will partly be offset by an increase in the realization of lung cancer risk with the life expectancy increase. For a hypothetical situation, when the entire population maintain a healthy lifestyle and mortality from cardiovascular, oncological, infectious diseases, diseases of the respiratory tract and from external causes has significantly decreased, the contribution of radon exposure to total mortality will increase to about 0.8%. If the average level of radon in buildings will increase due to energy-efficient technologies widespread implementation in building construction, the contribution of radon to total mortality will be even more noticeable.

Key words: radon, smoking, lung cancer, risk, model, prognosis.

References

1. National Research Council. Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase 2. Washington, DC: The National Academies Press; 2006. 422 p.
2. UNSCEAR Report 2006. Appendix A. Epidemiological studies of radiation and cancer. UNSCEAR. 2006; 392 p.
3. National Research Council. Health Risks of Exposure to Radon: BEIR VI. Washington, DC: The National Academies Press. 1999; 592 p.
4. Grosche B, Kreuzer M, Kreisheimer M, et al. Lung cancer risk among German male uranium miners: a cohort study, 1946–1998. *British Journal of Cancer*. 2006;95: 1280–1287. DOI: 10.1038/sj.bjc.6603403.
5. Tomasek L, Roge A, Tirmarche M, et al. Lung Cancer in French and Czech Uranium Miners: Radon-Associated Risk at Low Exposure Rates and Modifying Effects of Time since Exposure and Age at Exposure. *Radiation Research*. 2008;169(2): 125–137. DOI: 10.1667/RR0848.1.

Georgy P. Malinovsky

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

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

6. Tomasek L. Effect of age at exposure in 11 underground miners studies. *Radiation Protection Dosimetry*. 2014;160(1–3): 120–123. DOI: 10.1093/rpd/ncu068.
7. ICRP. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Ann. ICRP*. 1991;21(1–3). (In Russian).
8. EPA Radiogenic Cancer Risk Models and Projections for the U.S. Population.. U.S. Environmental Protection Agency. Report EPA 402-R-11-001; 2011. 175 p. Available on: http://www.philrutherford.com/Radiation_Risk/EPA-402-R-11-001.pdf. (Accessed 16.11.2020).
9. EPA assessment of risks from radon in homes. Report EPA 402-R-03-003, US Environmental Protection Agency, Washington. 2003; 98 p. Available on: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-05/documents/402-r-03-003.pdf>. (Accessed 16.11.2020).
10. Zhukovsky M, Bastrikova N, Vasilyev A. Relative biological effectiveness of alpha particles at radon exposure. *Radiation Protection Dosimetry*. 2015;164(4): 467–470. DOI: 10.1093/rpd/ncv334.
11. Zhukovsky M, Yarmoshenko I. Radon Exposure and Dose Calculation: Problems of Choice. Proc. Third Int. Conf. on Radiation and Applications in Various Fields of Research. Budva, Montenegro; 2015. P. 343–348.
12. ICRP. International Commission on Radiological Protection. Protection against Radon-222 at Home and at Work. ICRP Publication 65. *Annals of the ICRP*. 1993. 23(2).
13. ICRP. International Commission on Radiological Protection. Occupational intakes of radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. *Annals of the ICRP*. 2017. 46(3–4).
14. WHO Mortality Database. World Health Organization. 2020. Available on: https://www.who.int/healthinfo/mortality_data/en/. (Accessed 16.11.2020).
15. Simonato L, Agudo A, Ahrens W, et al. Lung cancer and cigarette smoking in Europe: An update of risk estimates and an assessment of inter-country heterogeneity. *International Journal of Cancer*. 2001;91: 876–887. DOI: 10.1002/1097-0215(200102)999:999<::aid-ijc1139>3.0.co;2-7.
16. Darby S, Hill D, Auvinen A, et al. Residential radon and lung cancer: detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 subjects with lung cancer and 14208 subjects without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*. 2006;32(1): 1–83.
17. Yu Y, Liu H, Zheng S, et al. Gender susceptibility for cigarette smoking-attributable lung cancer: A systematic review and meta-analysis. *Lung Cancer*. 2014;85: 351–360. DOI: 10.1016/j.lungcan.2014.07.004.
18. Kreuzer M, Boffetta P, Whitley E, et al. Gender differences in lung cancer risk by smoking: a multicentre case-control study in Germany and Italy. *British Journal of Cancer*. 2000;82(1): 227–233. DOI: 10.1054/bjoc.1999.0904.
19. Ando M, Wakai K, Seki N, et al. Attributable and absolute risk of lung cancer death by smoking status: findings from the Japan collaborative cohort study. *International Journal of Cancer*. 2003;105: 249–254. DOI: 10.1002/ijc.11043.
20. Lubin JH, Caporaso NE. Cigarette Smoking and Lung Cancer: Modeling Total Exposure and Intensity. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev*. 2006;15(3): 517–523. DOI: 10.1158/1055-9965.EPI-05-0863.
21. Powell HA, Iyen-Omofoman B, Hubbard RB, et al. The Association Between Smoking Quantity and Lung Cancer in Men and Women. *Chest*. 2013;143(1) 123–129. DOI:10.1378/chest.12-1068.
22. Papadopoulos A, Guida F, Lefondre K, et al. Heavy smoking and lung cancer: Are women at higher risk? Result of the ICARE study. *British Journal of Cancer*. 2014;110: 1385–1391. DOI: 10.1038/bjc.2013.821.
23. Remen T, Pintos J, Abrahamowicz M, Siemiatycki J. Risk of lung cancer in relation to various metrics of smoking history: a case-control study in Montreal. *BMC Cancer*. 2018;18: 1275. DOI: 10.1186/s12885-018-5144-5.
24. Yarmoshenko IV, Malinovsky GP. Combined analysis of on-to-epidemiological studies of the relationship between lung cancer and indoor radon exposure. *NUKLEONIKA*. 2020;65: 83–88. DOI: 10.2478/nuka-2020-0012.
25. European Health Information Gateway. Health for All Explorer. World Health Organization. Available on: <https://gateway.euro.who.int/en/hfa-explorer>. (Accessed 16.11.2020).
26. Perlman F, Bobak M, Gilmore A, McKee M. Trends in the prevalence of smoking in Russia during the transition to a market economy. *Tobacco Control*. 2007;16: 299–305. DOI: 10.1136/tc.2006.019455.
27. Krasovsky KS. Smoking prevalence among adults in the Russian Federation. *Tobacco Control and Public Health in Eastern Europe*. 2011;1(1): 61–63. (In Russian).
28. Herzfeld T, Huffman S, Rizov M. The dynamics of food, alcohol and cigarette consumption in Russia during transition. *Economics & Human Biology*. 2014;13: 128–143. DOI: 10.1016/j.ehb.2013.02.002.
29. Quirimbach D, Gerry CJ. Gender, education and Russia's tobacco epidemic: A life-course approach. *Social Science & Medicine*. 2016;160: 54–66. DOI: j.socscimed.2016.05.008
30. Global Adult Tobacco Survey (GATS), Russian Federation, 2009. Country Report. Available on: https://www.who.int/tobacco/surveillance/ru_tfi_gatsrussian_countryreport.pdf?ua=1. (Accessed 16.11.2020). (In Russian).
31. Global Adult Tobacco Survey: An Overview 2016. Available on: https://static-1.rosminzdrav.ru/system/attachments/attaches/000/036/485/original/GATS-краткий_отчет-рус.pdf?1511269867. (Accessed 16.11.2020). (In Russian).
32. Yarmoshenko IV, Malinovsky GP, Onishchenko AD, Vasilyev AV. Problem of radon exposure in energy-efficient buildings: a review. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(4): 56–65. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-56-65.
33. Vasilyev AV, Zhukovsky MV, Onishchenko AD, Vishnevsky AA. Building materials as a source of radon in buildings built using modern technologies. *Stroitelnye materialy = Construction Materials*. 2013. N 4: 104–107. (in Russian)
34. Yarmoshenko IV, Vasilyev AV, Onishchenko AD, et al. Indoor radon problem in energy efficient multi-storey buildings. *Radiation Protection Dosimetry*. 2014;160(1–3): 53–56. DOI: 10.1093/rpd/ncu110.
35. Vasilyev AV, Yarmoshenko IV, Zhukovsky MV. Low air exchange rate causes high indoor radon concentration in energy-efficient buildings. *Radiation Protection Dosimetry*. 2015. 164(4): 601–605. DOI: 10.1093/rpd/ncv319.
36. Vasilyev AV, Yarmoshenko IV, Zhukovsky MV. Radon safety of modern multi-storey buildings with different energy efficiency classes. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(1): 80–84. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-1-80-84.
37. Yarmoshenko I, Zhukovsky M, Onishchenko A, Vasilyev A, Malinovsky G. Factors influencing temporal variations of radon concentration in high-rise buildings. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021; 232: 106575.
38. Yarmoshenko I, Malinovsky G, Vasilyev A, Onishchenko A, Seleznev A. Geogenic and anthropogenic impacts on indoor radon in the Techa River region. *Science of the Total Environment*. 2016;571: 1298–303. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.170
39. Tomasek L. Interaction of radon and smoking among Czech uranium miners. *Radiation Protection Dosimetry*. 2011;145(2–3): 238–242. DOI: 10.1093/rpd/ncr048.
40. Tomasek L. Lung Cancer Risk from Occupational and Environmental Radon and Role of Smoking in Two Czech Nested Case-Control Studies. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2013;10: 963–979. DOI: 10.3390/ijerph10030963

41. Zhukovsky M, Onishchenko A. Calculation of Dose Conversion Factors Based on the Results of Geometric Mixture Models for Risk Assessment of Radon Exposure. *Radiation Protection Dosimetry*. 2020. 191(2):181-187. DOI: 10.1093/rpd/ncaa145.
42. Onishchenko AD, Zhukovsky MV. The role of confounding factors in a radon epidemiological study. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(1): 65–75. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-1-65-75
43. Onishchenko AD, Varaksin AN, Zhukovsky MV. Analysis of approaches to the formation of a control group in radon epidemiological case-control studies. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(3): 76–89. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-3-76-89.
44. Peto R, Lopez A, Boreham J, et al. Mortality from tobacco in developed countries: indirect estimation from national vital statistics. *Lancet*. 1992;339: 1268–1278. DOI: 10.1016/0140-6736(92)91600-d.
45. Darby S, Hill D, Auvinen A, et al. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *British Medical Journal*. 2005;330: 223–227. DOI: 10.1136/bmj.38308.477650.63.
46. Graham H. Smoking prevalence among women in the European community 1950–1990. *Social Science & Medicine*. 1996;43(2): 243–254. DOI: 10.1016/0277-9536(95)00369-x.
47. Zato ski W, Przewo niak K, Sulkowska U, et al. Tobacco smoking in countries of the European Union. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*. 2012. 19(2): 181–192.
48. Cinelli G, De Cort M, Tollefsen T. European Atlas of Natural Radiation, Publications Office of the European Union. Luxembourg. 2019. Available on: <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/european-atlas-natural-radiation-0>. (Accessed 16.11.2020).
49. Yarmoshenko I, Malinovsky G, Vasilyev A, Zhukovsky M. Reconstruction of national distribution of indoor radon concentration in Russia using results of regional indoor radon measurement programs. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2015;150: 99–103. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2015.08.007.
50. Yarmoshenko IV, Onishchenko AD, Malinovsky GP, et al. Radon concentration in conventional and new energy efficient multi-storey apartment houses: results of survey in four Russian cities. *Scientific Reports*. 2020;10: 18136. DOI:10.1038/s41598-020-75274-4.
51. Kaprin AD, Starinskiy VV, Petrova GV. Malignant neoplasms in Russia in 2018 (morbidity and mortality). Moscow P. A. Herzen Institute – branch of the Federal State Budgetary Institution “National Institute of Radiology” of the Ministry of Health of Russia; 2019. 250 p. (In Russian).
52. Global, regional, and national comparative risk assessment of 84 behavioral, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks, 1990–2016: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016. *Lancet*. 2017;390: 1345–1422. DOI: 10.1016/S0140-6736(17)32366-8.

Received: May 21, 2021

Mikhail V. Zhukovsky – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director, Head Researcher, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

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

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

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

For citation: Zhukovsky M.V., Yarmoshenko I.V., Onishchenko A.D., Malinovsky G.P. Prognostic assessment of lung cancer risk under combined action of radon and smoking using an additive-multiplicative risk model. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No. 3. P.41-55. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-41-55

Оценка радиационного риска у пациентов при проведении медицинских исследований в Российской Федерации

В.Ю. Голиков, А.В. Водоватов, Л.А. Чипига, И.Г. Шацкий

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

Целью исследования являлась разработка методики оценки радиационного риска для пациентов, подвергающихся медицинским исследованиям в Российской Федерации. В основе методики лежат модели риска Публикации 103 МКРЗ, коэффициенты пожизненного радиационного риска для российской популяции и собственные результаты оценки типичных доз облучения пациентов, подвергающихся различным медицинским исследованиям в Российской Федерации. Для 30 исследований, определяющих около 80% коллективной дозы населения Российской Федерации от медицинского облучения, радиационный риск был рассчитан с использованием «золотого стандарта», а именно органов доз и соответствующих половозрастных коэффициентов риска для российской популяции. Для остальных медицинских исследований (за исключением маммографии) для оценки радиационного риска использовали значения коэффициентов риска, рассчитанных на 1 мЗв эффективной дозы, представляющей собой ее усредненное значение для 4 выбранных анатомических областей тела: голова, шея, грудная клетка и брюшная полость — таз. Предполагается, что в рамках такого подхода погрешность оценки риска возрастет по отношению к погрешности оценки риска, оцененной для вышеупомянутых 30 исследований, не более чем на $\pm 30\%$. Показано, что значения пожизненного риска смерти с учётом вреда от снижения качества жизни по причине онкологического заболевания и наследственных эффектов варьируют в зависимости от пола и возраста пациента различным образом в зависимости от того, какие органы подвергаются облучению во время медицинского исследования. Оценки риска для некоторых исследований и значений возраста и пола пациента, рассчитанные с использованием «золотого стандарта», могут отличаться от полученных с помощью эффективной дозы и номинальных коэффициентов риска МКРЗ, усредненных по возрасту и полу, до порядка величины. Продемонстрированы различия в оценках риска у пациентов, связанные с использованием коэффициентов риска для российской и композитной популяции.

Ключевые слова: медицинские исследования, пациенты, радиационный риск, номинальные коэффициенты риска, эффективная доза.

Введение

При использовании источников ионизирующего излучения в медицине облучение персонала и населения регулируется с использованием всех 3 принципов радиационной защиты: обоснования, оптимизации и ограничения облучения, в то время как облучение пациентов – с помощью только 2 (ограничение доз облучения пациентов не применяется) [1–3]. В связи с этим, учитывая, что использование на практике принципов обоснования и оптимизации основано на сопоставлении пользы и риска для пациента от проведения лечебно-диагностической процедуры, уровни облучения должны быть выражены в терминах дозовых величин, позволяющих оценить радиационный риск от применения данной процедуры. Решение этого вопроса находится в компетенции врача лучевой диагностики и медицинского физика на основе направления/обоснования лечащего врача. То есть медицинский персонал как в рам-

ках своей профессиональной деятельности, так и при общении с пациентами должен обладать доступной информацией об уровнях радиационного риска при проведении рентгенодиагностических исследований.

До последнего времени МКРЗ не рекомендовала использовать эффективную дозу и номинальные коэффициенты риска для определения радиационных рисков медицинского облучения пациентов. Однако на практике это широко использовалось. Для целей оценки радиационного пожизненного атрибутивного риска возникновения стохастических эффектов «золотым стандартом» считается использование поглощенных доз в органах и соответствующих индивидуальных коэффициентов риска для этих органов с учетом их зависимости от возраста и пола пациента, подвергающегося медицинской процедуре [1]. Применение же эффективной дозы в отношении пациентов МКРЗ ограничивала сравнением доз:

Голиков Владислав Юрьевич

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

Адрес для переписки: 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: sg235@rambler.ru

– при выполнении различных диагностических исследований;

– при использовании одинаковых медицинских технологий и протоколов в различных медицинских организациях или странах;

– при использовании различных медицинских технологий и протоколов в рамках проведения одного медицинского исследования, так как для этих целей малопригодными являются такие измеряемые дозовые параметры, как, например, произведение дозы на площадь. При этом при таких сравнениях предполагается, что состав выборок пациентов в отношении их возраста и пола аналогичен.

Однако в своей недавней Публикации 147 МКРЗ признала, что, учитывая неопределенности оценки риска при воздействии малых доз, эффективную дозу с учетом поправок на вариации риска в зависимости от возраста и пола можно использовать для грубой оценки (approximate indicator of possible risk) радиационного риска у пациентов [4]. Собственно попытка реализовать на практике этот подход для более корректной оценки риска медицинского облучения, т.е. использовать вместо номинальных значений коэффициентов риска коэффициенты риска, зависящие от возраста и пола пациентов, и являлась предметом настоящего исследования.

Предыдущая методика оценки радиационного риска у пациентов в РФ МР 2.6.1.0098-15¹, опирающаяся на соответствующие исследования, посвященные использованию коэффициентов риска, зависящих от возраста и пола пациентов [5–8], имеет ряд недостатков:

1) не учитывается различный вид зависимости органных коэффициентов риска от возраста пациента (эта зависимость полагается одинаковой и соответствующей однородному облучению тела);

2) дети всех возрастов объединены в одну группу, а взрослые представлены двумя возрастными группами, что является, на наш взгляд, слишком грубым приближением;

3) используются значения пожизненных атрибутивных рисков, усредненных по композитной (европейско-американской и азиатской) популяции (т.е. не используются данные российского ракового регистра).

Цель исследования – разработка методики оценки радиационного риска для пациентов, подвергающихся медицинским исследованиям в РФ, с использованием коэффициентов риска, зависящих от возраста и пола пациентов.

Модель медицинского облучения для расчета радиационных рисков пациентов в РФ

Для расчетов радиационного риска у пациентов медицинские исследования в РФ были разделены на несколько групп:

1. Тридцать наиболее часто встречающихся на практике медицинских исследований (Список «тридцати»), относящихся к разным технологиям получения медицинского изображения (рентгенография, рентгеноскопия, компьютерная томография, интервенционные исследования, радионуклидная диагностика), вклад которых в коллективную дозу населения РФ от медицинского облучения составляет более 80% [8].

Дозиметрическая модель каждого из них была представлена типичным набором физико-технических и геометрических параметров, собранных нами ранее в медицинских организациях РФ [9–15] и там, где это было необходимо, заимствованных из литературы [16–19]. В таблице 1 приведен состав и количество проекций, представляющих эти исследования, в зависимости от возраста пациента для рентгенографии, рентгеноскопии и интервенционных исследований; количество фаз для КТ-исследований и средние значения вводимых активностей при выполнении исследований радионуклидной диагностики.

Значения органных и эффективных доз для этих исследований были рассчитаны с использованием ком-

Таблица 1

Типичные характеристики рассматриваемых медицинских исследований в зависимости от возраста пациента

[Table 1]

Typical characteristics of the medical examinations under consideration depending on the age of the patient

	Возраст пациента, лет [Age of patient, years]				
	0–4	5–9	10–14	15–19	> 20
Рентгенография [Plain radiography]	Состав и количество проекций [Projections]				
Череп [Skull]	ПЗ+0,5Б [AP+0.5Lat]	ПЗ+0,5Б [AP+0.5Lat]	ПЗ+0,5Б [AP+0.5Lat]	ПЗ+0,5Б [AP+0.5Lat]	ПЗ+0,5Б [AP+0.5Lat]
ШОП [Cervical spine]	ПЗ+0,5Б [AP+0.5Lat]	ПЗ+0,5Б [AP+0.5Lat]	ПЗ+0,5Б [AP+0.5Lat]	ПЗ+0,5Б [AP+0.5Lat]	ПЗ+Б [AP+Lat]
ГОП [Thoracic spine]	ПЗ+0,5Б [AP+0.5Lat]	ПЗ+0,5Б [AP+0.5Lat]	ПЗ+0,5Б [AP+0.5Lat]	ПЗ+0,5Б [AP+0.5Lat]	ПЗ+Б [AP+Lat]
ОГК [Chest]	ПЗ+0,5Б [AP+0.5Lat]	ЗП+0,5Б [PA+0.5Lat]	ЗП+0,5Б [PA+0.5Lat]	ЗП+0,5Б [PA+0.5Lat]	ЗП+0,5Б [PA+0.5Lat]

¹ Методические рекомендации «Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенорадиологических исследований». МР 2.6.1.0098-15: <http://niirg.ru/PDF/MR-2.6.1.0098-15.pdf> (Дата обращения: 10.06.2021) [Methodical guidelines "Assessment of the radiation risk from X-ray and nuclear medicine examinations". MR 2.6.1.0098-15 (Accessed: 10.06.2021) (In Russ.)]

	Возраст пациента, лет [Age of patient, years]				
	0–4	5–9	10–14	15–19	> 20
ПОП [Lumbar spine]	ПЗ+0,5Б [AP+0.5Lat]	ПЗ+0,5Б [AP+0.5Lat]	ПЗ+0,5Б [AP+0.5Lat]	ПЗ+0,5Б [AP+0.5Lat]	ПЗ+Б [AP+Lat]
БП [Abdomen]	ПЗ [AP]	ПЗ [AP]	ПЗ [AP]	ПЗ [AP]	ПЗ [AP]
Таз [Pelvis]	ПЗ+0,4Б [AP+0.4Lat]	ПЗ+0,4Б [AP+0.4Lat]	ПЗ+0,4Б [AP+0.4Lat]	ПЗ+0,4Б [AP+0.4Lat]	ПЗ+0,4Б [AP+0.4Lat]
Рентгеноскопия [Fluoroscopy]	Состав и количество проекций [Projections]				
Пищевода [Ba follow]			4ПЗ+ 1Б [4AP+1Lat]	4ПЗ+ 1Б [4AP+1Lat]	3ПЗ + 1 3П + 2Б [3AP+1PA+2Lat]
Желудка [Ba meal]	4ПЗ+ 1Б [4AP+1Lat]	4ПЗ+ 1Б [4AP+1Lat]	4ПЗ+ 1Б [4AP+1Lat]	4ПЗ+ 1Б [4AP+1Lat]	3ПЗ + 1 3П + 2Б [3AP+1PA+2Lat]
Ирригоскопия [Ba enema]			4ПЗ+ 1Б [4AP+1Lat]	4ПЗ+ 1Б [4AP+1Lat]	3ПЗ + 1 3П + 2Б [3AP+1PA+2Lat]
ИРЛИ [Interventional examination]	Состав и количество проекций [Projections]				
Исследование сосудов сердца [Cardiac angiography]	3П+LAO 90 [PA+LAO 90]	3П+LAO 90 [PA+LAO 90]	3П+LAO 90 [PA+LAO 90]	3П+LAO 90 [PA+LAO 90]	3П+LAO 90 [PA+LAO 90]
КТ [CT]	Количество фаз в исследовании [Number of scans]				
Головы [Head]	1	1	1	1	1
ОГК [Chest]	1	1	1	1	1
ОГК (контраст) [Chest with contrast]	2	2	2	2	2
ОБП [Abdomen]	1	1	1	1	1
ОБП (контраст) [Abdomen with contrast]	2	2	2	3	3-4
Радионуклидные исследования [Nuclear medicine examination]	Средние значения вводимых активностей РФП, МБк [Mean activity, MBq]				
Головной мозг ¹¹ C-метионин [Brain with ¹¹ C-metionine]	120	250	400	500	600
Головной мозг ¹⁸ F-ФДГ [Brain with ¹⁸ F-FDG]	70	100	130	145	150
Легкие ^{99m} Tc-макротех [Lung with ^{99m} Tc-MAA]	15	40	70	120	150
Печень ^{99m} Tc-бромезида [Liver with ^{99m} Tc-IDA]	45	55	70	115	150
Печень ^{99m} Tc-технефит [Liver with ^{99m} Tc-colloid]	25	45	70	115	150
Почки ¹²³ I-гиппуран [Renal with ¹²³ I-hyppuran]	9	20	28	30	30
Почки ^{99m} Tc-пентатех [Renal with ^{99m} Tc-DTPA]	25	40	75	125	150

	Возраст пациента, лет [Age of patient, years]				
	0–4	5–9	10–14	15–19	> 20
Почки ^{99m}Tc -технемаг [Renal with ^{99m}Tc MAG3]	20	40	70	120	150
Скелет ^{99m}Tc -фосфаты [Bone with ^{99m}Tc -phosphates and phosphonates]	165	290	425	550	600
Тело ^{18}F -ФДГ [Whole body with ^{18}F -FDG]	100	175	235	285	300
Тело ^{67}Ga -цитрат [Whole body with ^{67}Ga -cytrate]	35	67	100	175	250
Тело ^{123}I -МИБГ [Whole body with ^{123}I -MIBG]	65	110	140	200	250
ЩЖ ^{123}I -NaI [Thyroid with ^{123}I -NaI]	5	7	9	10	10
ЩЖ ^{99m}Tc -пертехнетат [Thyroid with ^{99m}Tc -pertechnetate]	60	80	90	175	250

пьютерных программ PCXMC 2.0 [20] и EDEREX [21] для рентгенографии, рентгеноскопии и интервенционных исследований и NCICT 2.01 [22] для компьютерной томографии. Расчет органных и эффективной доз у пациентов при выполнении исследований радионуклидной диагностики

проводили на основании средних активностей радиофармацевтических препаратов и дозовых коэффициентов для соответствующей возрастной группы пациентов [13, 23]. Результаты расчетов типичных значений эффективных доз представлены в таблице 2.

Таблица 2

Типичные значения эффективных доз (мЗв) при выполнении медицинских исследований в РФ, указанных в 1-й колонке таблицы

[Table 2]

Typical values of effective doses (mSv) for medical examinations performing in the Russian Federation, specified in the 1st column of the Table

Исследование [Examination]	Возрастная категория, лет [Age, years]				
	0–4	5–9	10–14	15–19	Взрослые [Adults]
Рентгенография [Plain radiography]					
Череп [Skull]	0,04	0,04	0,03	0,05	0,07
ШОП [Cervical spine]	0,08	0,10	0,10	0,13	0,15
ГОП [Thoracic spine]	0,27	0,40	0,45	0,61	0,84
ОГК [Chest]	0,06	0,08	0,08	0,12	0,17
ПОП [Lumbar spine]	0,33	0,52	0,57	1,12	1,90
БП [Abdomen]	0,22	0,34	0,45	0,78	1,14
Таз [Pelvis]	0,21	0,43	0,52	0,61	0,79
Флюорография [Fluorography]					
Цифровая [Digital]				0,04	0,04
Пленочная [Film]				0,37	0,37
ИРЛИ [Interventional examination]					
Исследование сосудов сердца [Cardiac angiography]	5,30	4,60	6,60	13,0	19,0

Исследование [Examination]	Возрастная категория, лет [Age, years]				
	0–4	5–9	10–14	15–19	Взрослые [Adults]
Рентгеноскопия [Fluoroscopy]					
РС желудка [Ba meal]			1	1,3	1,8
РС пищевода [Ba follow]	0,88	0,74	1,1	3,9	8,0
Ирригоскопия [Ba enema]			1,0	4,7	10,4
Компьютерная томография [CT]					
КТ Голова [CT Head]	1,6	1,6	1,6	2,1	1,9
КТ ОГК [CT Chest]	2,6	2,8	3,2	4,3	5,2
КТ ОБП [CT Abdomen]	5,7	5,8	6,3	6,9	7,1
КТ ОГК (контраст) [CT Chest with contrast]	4,0	4,7	6,0	9,4	12
КТ ОБП (контраст) [CT Abdomen with contrast]	10	12	15	19	23
КТ всего тела [CT whole body]	14	13	13	14	15
Радионуклидные исследования [Nuclear medicine examination]					
СЦГ почек ^{99m} Tc-пентатех [Renal with ^{99m} Tc-DTPA]	0,44	0,47	0,55	0,70	0,77
СЦГ почек ^{99m} Tc-технемаг [Renal with ^{99m} Tc MAG3]	0,41	0,46	0,69	0,94	1,10
СЦГ почек ¹²³ I-гиппурин [Renal with ¹²³ I-hyppuran]	0,29	0,37	0,48	0,42	0,36
СЦГ тела ¹²³ I-МИБГ [Whole body with ¹²³ I-MIBG]	4,7	3,8	3,2	3,1	3,6
СЦГ скелета ^{99m} Tc-фосфаты [Bone with ^{99m} Tc-phosphates and phosphonates]	2,2	2,9	3	2,9	2,9
СЦГ тела ⁶⁷ Ga-цитрат [Whole body with ⁶⁷ Ga-citrate]		16	18	19	27
СЦГ печени ^{99m} Tc-бромезида	3,1	2,0	1,6	1,7	2,1
СЦГ печени ^{99m} Tc-технефит [Liver with ^{99m} Tc-colloid]	1,4	0,93	1,0	1,2	1,4
СЦГ легких ^{99m} Tc-макротех [Lung with ^{99m} Tc-MAA]	0,72	1,1	1,3	1,6	1,8
СЦГ ЩЖ ^{99m} Tc-пертехнетат [Thyroid with ^{99m} Tc-pertecnetate]	2,6	1,7	1,3	1,5	2,1
СЦГ ЩЖ ¹²³ I-Nal [Thyroid with ¹²³ I-Nal]	4,5	3,0	1,8	1,5	1,1
ПЭТ/КТ тела ¹⁸ F-ФДГ [Whole body with ¹⁸ F-FDG]	9,6	8,4	6,7	5,5	6,1
ПЭТ/КТ ГМ ¹¹ C-метионин [Brain with ¹¹ C-metionine]	5,4	5,6	5,7	5,8	5,5
ПЭТ/КТ ГМ ¹⁸ F-ФДГ [Brain with ¹⁸ F-FDG]	6,1	4,7	3,9	2,8	3,1

Пожизненный радиационный риск смерти с учётом вреда для здоровья от снижения качества жизни по причине онкологического заболевания у пациента пола G и возраста A (лет) и наследственного заболевания его потомков можно оценить, зная поглощенные дозы в органах и тканях, обусловленные проведением медицинского исследования и значения коэффициентов пожизненного радиационного риска при облучении отдельных органов и тканей пациента единичной дозой («золотой стандарт»):

$$R(A, G) = \sum_O D(A, G, O) \cdot r(A, G, O) \quad (1)$$

где: $R(A, G)$ – пожизненный радиационный риск смерти с учётом вреда для здоровья от снижения качества жизни по причине онкологического заболевания у пациента пола G и возраста A (лет) и наследственного заболе-

вания его потомков вследствие проведения рентгено-радиологического исследования, отн. ед.;

$D(A, G, O)$ – поглощенная доза в органе O у пациента пола G при облучении в возрасте A (лет) вследствие проведения рентгено-радиологического исследования, мГр;

$r(A, G, O)$ – коэффициент пожизненного радиационного риска смерти с учётом вреда от снижения качества жизни при облучении органа O дозой 1 мГр у лица пола G в возрасте A (лет), мГр⁻¹.

Для расчета рисков у пациентов при выполнении исследований из Списка 30 использовались значения поглощенных доз в органах и коэффициенты пожизненного радиационного риска смерти с учётом вреда от снижения качества жизни по причине онкологического

заболевания различных органов и тканей после их облучения дозой 1 мГр для мужчин (9 органов, включая «остальные органы») и женщин (11 органов, включая «остальные органы»). При расчете риска не были включены раки кости и кожи. Для российской популяции значения коэффициентов пожизненного радиационного риска были заимствованы из МР 2.6.1.0098-15, а для композитной (европейско-американской и азиатской) популяции из работ [6, 24].

2. Остальные медицинские исследования, не вошедшие в Список «тридцати» (за исключением маммографии)

Для оценки риска от этих медицинских исследований, менее часто применяющихся в медицинской практике и дающих менее 20% вклада в коллективную дозу медицинского облучения населения, использовали подход, предложенный в [6]. В рамках этого подхода в зависимости от того, в какой области тела проводится рентгенологическое исследование, значение радиационного риска у пациента получают умножением эффективной дозы, определенной согласно МУ 2.6.1.2944-11² и МУ 2.6.1.3584-19³, на половозрастной коэффициент риска, нормированный на единичную эф-

фективную дозу при выполнении медицинских исследований в 4 областях тела: голова, шея, грудная клетка и брюшная полость – таз (табл. 3). Если исследование проводилось в нескольких областях тела, то рекомендуется использовать половозрастные коэффициенты риска, соответствующие равномерному облучению тела. Коэффициенты риска, представленные в таблице 3, были получены путем усреднения значений, полученных делением половозрастных коэффициентов риска для исследований из Списка 30, на соответствующее данному исследованию значение эффективной дозы. Усреднялись половозрастные значения коэффициентов риска для следующих исследований, проводимых в соответствующих 4 областях тела:

- голова (графия черепа передне-заднее облучение (ПЗ) + 0,5 боковая проекция (Б) и КТ головы);
- шея (шейный отдел позвоночника (ШОП) ПЗ+Б);
- грудная клетка (ОГК) (графия ОГК ЗП+0,5Б, интервенционные исследования сосудов сердца, графия грудного отдела позвоночника (ГОП) ПЗ+Б и КТ ОГК);
- брюшная полость (БП) – таз (графия БП ПЗ, КТ брюшной полости, графия таза ПЗ+0,4Б, графия пояс-

Таблица 3

Коэффициенты пожизненного риска смерти с учётом вреда от снижения качества жизни, рассчитанные на 1 мЗв эффективной дозы (Публикация 60 МКРЗ [29]), для медицинских исследований, проводимых в указанных областях тела и при равномерном облучении

[Table 3

The lifetime detriment-weighted radiation risk coefficients taking into account the harm to reduce the quality of life calculated per 1 mSv effective dose (Publication 60 ICRP [29]) for medical examinations conducted in indicated areas of the body and with uniform irradiation]

Возраст, лет [Age, years]	r(A, G, O), мЗв ⁻¹									
	Равномерное облучение [Uniform exposure]		Голова [Head]		Шея [Neck]		Грудная клетка [Chest]		Брюшная полость [Abdomen]	
	М [M]	Ж [F]	М [M]	Ж [F]	М [M]	Ж [F]	М [M]	Ж [F]	М [M]	Ж [F]
0–4	7,6E-05	1,8E-04	1,2E-04	2,2E-04	7,2E-05	2,6E-04	5,6E-05	2,2E-04	5,8E-05	1,1E-04
5–9	6,6E-05	1,5E-04	1,1E-04	1,7E-04	6,0E-05	1,9E-04	5,0E-05	1,8E-04	5,3E-05	9,9E-05
10–14	5,8E-05	1,2E-04	1,3E-04	1,5E-04	5,0E-05	1,5E-04	4,6E-05	1,4E-04	4,6E-05	7,8E-05
15–19	5,1E-05	9,8E-05	1,0E-04	1,1E-04	3,7E-05	1,0E-04	4,4E-05	1,0E-04	4,2E-05	6,2E-05
20–24	4,3E-05	8,2E-05	7,9E-05	9,5E-05	2,7E-05	7,1E-05	4,0E-05	8,1E-05	3,9E-05	5,6E-05
25–29	3,8E-05	6,9E-05	7,0E-05	8,0E-05	2,2E-05	5,1E-05	3,8E-05	7,1E-05	3,4E-05	4,8E-05
30–34	3,5E-05	5,8E-05	6,3E-05	6,7E-05	1,8E-05	3,6E-05	3,6E-05	6,3E-05	3,0E-05	4,1E-05
35–39	3,1E-05	4,9E-05	5,6E-05	5,6E-05	1,5E-05	2,6E-05	3,4E-05	5,6E-05	2,6E-05	3,5E-05
40–44	2,8E-05	4,6E-05	5,3E-05	6,9E-05	1,3E-05	2,2E-05	3,3E-05	5,7E-05	2,2E-05	3,2E-05
45–49	2,4E-05	3,7E-05	4,6E-05	5,5E-05	1,1E-05	1,6E-05	2,9E-05	4,9E-05	1,9E-05	2,6E-05
50–54	2,0E-05	3,0E-05	3,9E-05	4,2E-05	8,3E-06	1,1E-05	2,6E-05	4,1E-05	1,5E-05	2,0E-05
55–59	1,6E-05	2,4E-05	3,2E-05	3,2E-05	6,4E-06	8,1E-06	2,1E-05	3,4E-05	1,2E-05	1,6E-05
60–64	1,2E-05	1,8E-05	2,6E-05	2,4E-05	4,8E-06	5,8E-06	1,7E-05	2,7E-05	8,5E-06	1,1E-05

² МУ 2.6.1.2944-11. Контроль эффективных доз облучения пациентов при медицинских рентгенологических исследованиях. М.: Роспотребнадзор, 2011. 40 с. [MU 2.6.1.2944-11. Control of the effective patient doses from medical X-ray examinations. M. Rosptotrebnadzor. 2011. 40 p. (In Russ.)]

³ МУ 2.6.1.3584-19. Изменения в МУ 2.6.1.2944-11 «Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований». Методические указания» (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 30.10.2019) [MU 2.6.1.3584-19 Updates to MU 2.6.1.2944-11. Control of the effective patient doses from medical X-ray examinations(In Russ.)]

Возраст, лет [Age, years]	$r(A, G, O), \text{мЗв}^{-1}$									
	Равномерное облучение [Uniform exposure]		Голова [Head]		Шея [Neck]		Грудная клетка [Chest]		Брюшная полость [Abdomen]	
	М [M]	Ж [F]	М [M]	Ж [F]	М [M]	Ж [F]	М [M]	Ж [F]	М [M]	Ж [F]
65–69	8,9E-06	1,3E-05	2,1E-05	1,7E-05	3,6E-06	3,8E-06	1,3E-05	2,0E-05	6,0E-06	7,6E-06
70–74	6,2E-06	8,2E-06	1,6E-05	1,1E-05	2,6E-06	2,4E-06	9,5E-06	1,3E-05	4,0E-06	4,6E-06
75–79	4,1E-06	4,7E-06	1,2E-05	6,6E-06	1,8E-06	1,4E-06	6,4E-06	7,9E-06	2,5E-06	2,5E-06
80–84	2,7E-06	2,7E-06	8,4E-06	3,9E-06	1,2E-06	7,8E-07	4,3E-06	4,6E-06	1,6E-06	1,4E-06
85+	1,4E-06	7,6E-07	5,9E-06	2,2E-06	7,7E-07	3,3E-07	2,1E-06	1,3E-06	8,6E-07	4,2E-07

ничного отдела позвоночника (ПОП) ПЗ+Б и рентгеноскопия желудка).

Таким образом, были получены модифицированные значения коэффициентов риска, выражающих риск смерти с учётом вреда от снижения качества жизни по причине онкологического заболевания различных органов и тканей для мужчин и женщин из различных возрастных интервалов на момент облучения на единицу эффективной дозы.

На рисунке 1 в качестве примера приведены зависимости от возраста значений коэффициентов риска для мужчин, рассчитанных на 1 мЗв эффективной дозы для медицинских исследований в 4 областях тела: голова, шея, грудная клетка и брюшная полость – таз, в сравнении с их значениями для равномерного облучения тела. На рисунке 2 приведены отличия в % этих коэффициентов от аналогичных значений при равномерном облучении тела. Напомним, что именно модель равномерного облучения тела была принята в предыдущей методике оценки радиационного риска у пациентов МР 2.6.1.0098-15 в РФ.

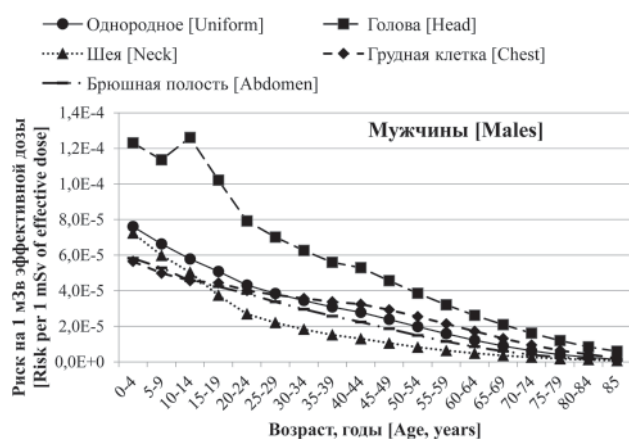


Рис. 1. Пожизненный риск смерти от рака, нормированный на единицу эффективной дозы, в зависимости от возраста при облучении и анатомической области исследования в сравнении с равномерным облучением всего тела для мужчин

[Fig. 1. Lifetime risk of death from cancer normalized by an effective dose depending on the age at exposure and anatomical region of examination in comparison with the uniform exposure of the whole body for men]

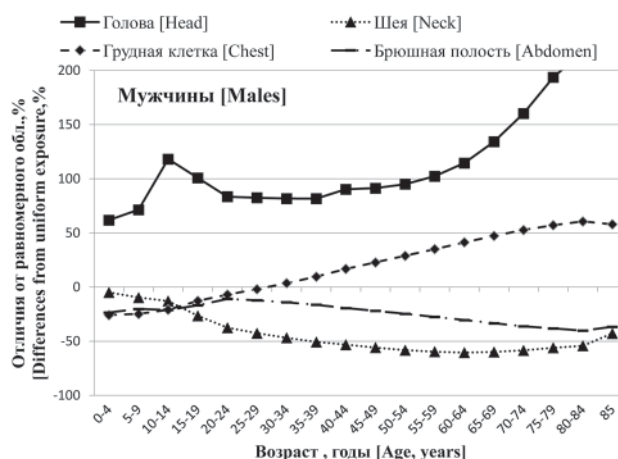


Рис. 2. Отличия значений коэффициентов риска, нормированных на единицу эффективной дозы, в зависимости от возраста и анатомической области тела по сравнению с равномерным облучением всего тела для мужчин
[Fig. 2. The differences of the risk coefficients values, normalized on the unit effective dose, depending on the age and anatomical region of the body compared to the uniform irradiation of the whole body for men]

Можно говорить о том, что ввиду большой неопределенности, связанной как с оценками риска заболеваемости раком на единицу дозы, так и с оценками органных и эффективных доз, различия менее чем в $\pm 50\%$ в коэффициентах риска можно считать приемлемыми. Поэтому половозрастные коэффициенты риска для равномерного облучения всего тела могут быть приняты как удовлетворительное приближение для тех рентгенологических исследований, у которых их значения не отличаются от случая равномерного облучения более чем на $\pm 50\%$. Этому условию удовлетворяют не все медицинские исследования (например, рентгенография и КТ головы (см. рис. 2)). Путем группирования исследований в 4 анатомических областях так, как это было представлено выше, было показано, что коэффициенты для отдельных типов рентгенологических исследований будут лежать в пределах $\pm 30\%$ от их средних значений для соответствующих анатомических областей (за исключением очень пожилых пациентов, где значения коэффициентов в любом случае являются очень низкими) [6].

3. Маммография

При этом виде рентгенологического исследования радиационный риск определяется фактически облучением лишь одного радиочувствительного органа – молочной железы. Поэтому определяли не эффективную дозу, а поглощенную дозу в молочной железе, учитывая ее размеры и физико-технические параметры проведения процедуры в соответствии с МУ 2.6.1.2944-11 и МУ 2.6.1.3584-19. Для оценки радиационного риска от полного маммографического исследования, состоящего из нескольких процедур, следует просуммировать поглощенные дозы от каждой входящей в него процедуры (всех снимков обеих молочных желез). Далее суммарную поглощенную дозу умножали на значение коэффициента риска для молочной железы (табл. 4), зависящее от возраста пациентки.

Обсуждение результатов

Одной из причин изменения оценок радиационного риска пациентов в рамках предлагаемой модели являются различия в коэффициентах риска, рассчитанных для российской и композитной популяции. На рисунке 3 в качестве примера представлены значения половозрастных коэффициентов риска заболеваемости раком для российской (МУ 2.6.1.0098-15) и композитной популяции [6, 24]. Непосредственно видно, что риск заболеваемости лейкемией приблизительно одинаков как для российского населения, так и для композитной популяции, тогда как риск заболеть солидным раком различных локализаций выше у композитной популяции, особенно это касается мужчин.

Таблица 4

Коэффициенты пожизненного риска смерти с учётом вреда от снижения качества жизни по причине рака молочной железы $r(A)$ после облучения дозой 1 мГр

[Table 4]

The lifetime detriment-weighted radiation risk coefficients taking into account the harm to reduce the quality of life due to cancer of a breast calculated per 1 mGy absorbed dose]

Возраст, лет [Age, years]	$r(A)$, мГр ⁻¹ [mGy ⁻¹]
0–4	3,8E-05
5–9	3,0E-05
10–14	2,3E-05
15–19	1,8E-05
20–24	1,4E-05
25–29	1,1E-05
30–34	8,3E-06
35–39	6,4E-06
40–44	4,7E-06
45–49	3,2E-06
50–54	2,1E-06
55–59	1,3E-06
60–64	7,8E-07
65–69	4,2E-07
70–74	2,0E-07
75–79	8,0E-08
80–84	3,0E-08

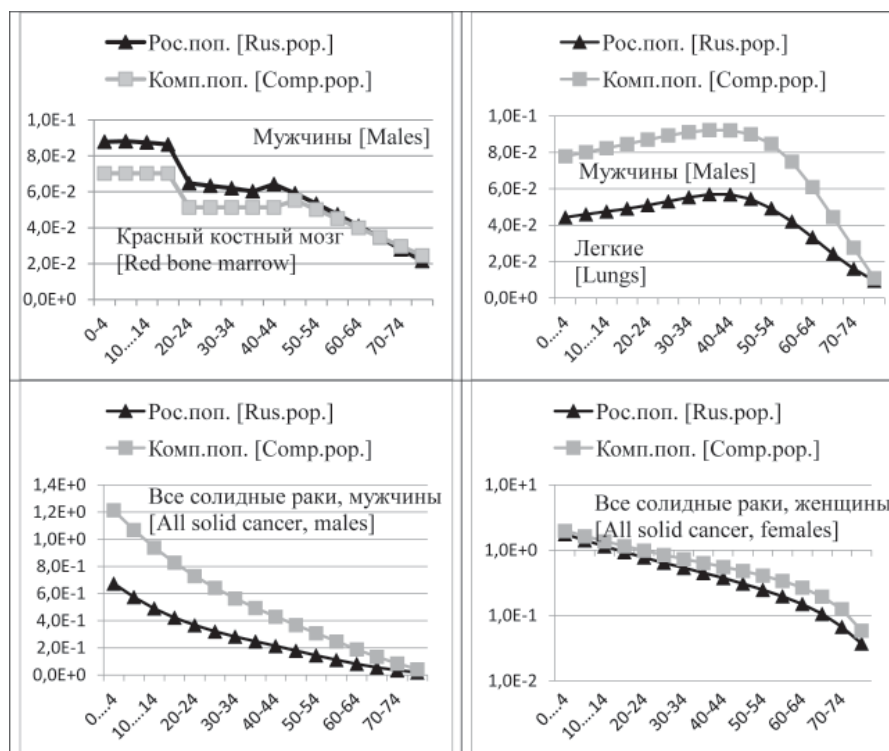


Рис. 3. Значения половозрастных коэффициентов риска заболеваемости раком для российской (МУ 2.6.1.0098-15) и композитной популяции [6, 24] (на 10 000 человек)

[Fig. 3. The values of sex/age risk coefficients of cancer incidence for the Russian (Methodical Instruction 2.6.1.0098-15) and Composite population [6, 24] (per 10,000 people)]

На рисунках 4 и 5 в качестве примеров представлены рассчитанные для российской и композитной популяции значения пожизненного радиационного риска смерти от рака у пациентов при проведении рентгенографического исследования ОГК и интервенционных исследований сосудов сердца. Значения пожизненного радиационного риска у пациентов рассчитывали двумя способами:

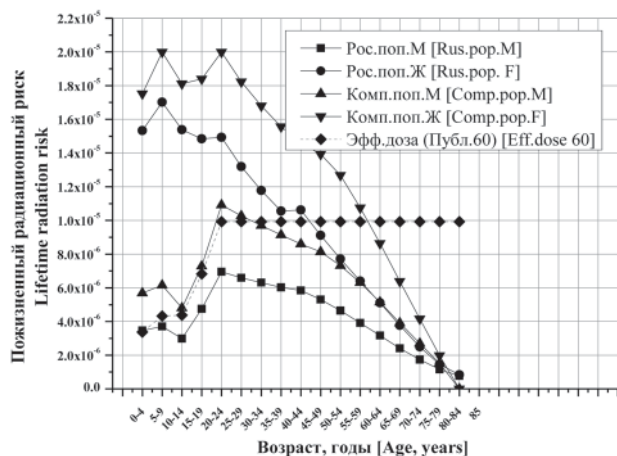


Рис. 4. Зависимость от возраста и пола пациентов значений пожизненного радиационного риска смерти от рака при проведении рентгенографии ОГК, рассчитанных для российской и композитной популяции, согласно «золотому стандарту» и эффективной дозе с номинальным коэффициентом риска [Fig. 4. Dependence on the age and sex of patients of the lifetime radiation risk of cancer death due to chest radiography, calculated for the Russian and Composite population, according to the "gold standard" and effective dose with a nominal risk coefficient]

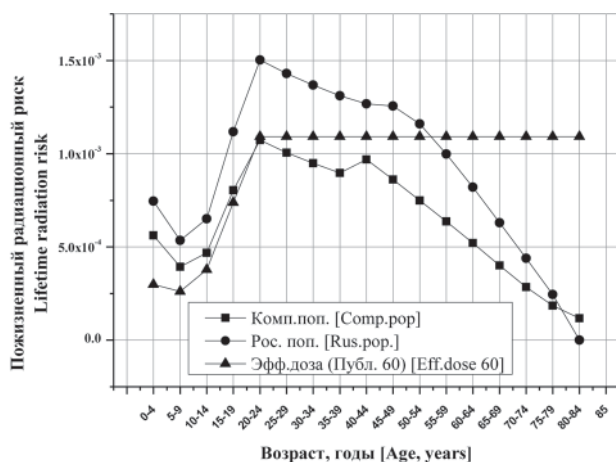


Рис. 5. Зависимость от возраста пациентов значений пожизненного радиационного риска смерти от рака при проведении интервенционных исследований сосудов сердца, рассчитанных для российской и композитной популяции, согласно «золотому стандарту» и эффективной дозе с номинальным коэффициентом риска [Fig. 5. Dependence on the age and sex of patients of the lifetime radiation risk of cancer death due to coronary angiography, calculated for the Russian and Composite population, according to the "gold standard" and effective dose with a nominal risk coefficient]

- с помощью органных доз и соответствующих коэффициентов риска («золотой стандарт»);
- с помощью эффективной дозы и номинального коэффициента риска, чтобы проиллюстрировать возможные погрешности при втором способе оценки риска в зависимости от возраста и пола пациента.

Видно, что радиационный риск у детей при проведении рентгенографического исследования органов грудной клетки (см. рис. 4) существенно зависит от пола и возраста, тогда как в предыдущей версии методики оценки риска эти отличия усреднялись как по полу, так и по возрасту от новорожденного до 18-летнего. Если для мальчиков и мужчин до 40 лет эффективная доза с номинальным коэффициентом риска позволяет удовлетворительно оценивать риск, то для девочек и молодых женщин недооценка риска может быть вплоть до 4 раз. Общей тенденцией является переоценка риска с помощью эффективной дозы для пожилых пациентов. Оценки риска для этого исследования, выполненные на основе коэффициентов риска для российской и композитной популяции, отличаются приблизительно в 1,5 раза.

При проведении интервенционных исследований сосудов сердца (см. рис. 5) оценка пожизненного риска на основании значений эффективной дозы с номинальным коэффициентом риска позволяет удовлетворительно оценивать риск на основе коэффициентов риска как для российской, так и для композитной популяции для пациентов приблизительно от 10 до 50–60 лет. Далее риск у пожилых пациентов будет серьезно завышен.

Для КТ-исследований, определяющих в настоящее время более 50% вклада в коллективную дозу населения РФ от медицинского облучения, оценки рисков, рассчитанных на основе органных доз и половозрастных коэффициентов риска и эффективной дозы и номинальных коэффициентов риска, выполненные в настоящей работе, существенно отличаются от аналогичных оценок, опубликованных в [25]. На рисунке 6 представлено такое

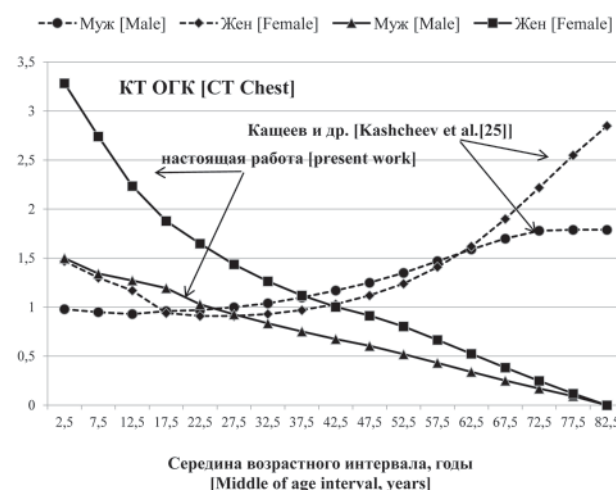


Рис. 6. Зависимость от возраста и пола пациента отношения рисков, рассчитанных на основе органных доз и половозрастных коэффициентов риска и эффективной дозы и номинальных коэффициентов риска при проведении КТ ОГК [Fig.6. The dependence on the age and sex of the patients risk ratios calculated on the basis of organ doses and age/sex risk coefficients and effective dose and nominal risk coefficients during CT Chest]

сравнение для КТ-исследования ОГК. Особое сомнение вызывает тренд увеличения значений отношения риска, рассчитанного с помощью методологии «золотого стандарта» к риску, полученному с помощью эффективной дозы и номинальных коэффициентов риска с увеличением возраста пациента для обоих полов. До сих пор для медицинских исследований наблюдалась обратная картина, связанная со снижением радиационного риска у пожилых пациентов (см. рис. 1).

Применение результатов

Рассчитанные значения пожизненного риска смерти для мужчин и женщин с учётом вреда от снижения качества жизни по причине онкологического заболевания различных органов и тканей и наследственных эффектов для 30 основных медицинских исследований разных категорий приведены в Приложении 2 к новым МР 2.6.1.0215-20⁴, предназначенным для оценки радиационного риска у пациентов, подвергающихся рентгенорадиологическим исследованиям в РФ. Эти значения были рассчитаны на основании органных доз и половозрастных коэффициентов риска, т.е. представляют собой наилучшие оценки риска и соответствуют типичным значениям эффективных доз, указанных в таблице 2. Если медицинское исследование, выполненное пациенту, содержится в списке исследований в Приложении 2 к МР 2.6.1. 0215-20 и реальная эффективная доза у пациента отличается от приведенной там типичной дозы для этого исследования не более чем на $\pm 30\%$, то рекомендуется использовать для оценки риска приведенное в Приложении 2 значение. В случае отличия значения реальной эффективной дозы у пациента от типичной более чем на $\pm 30\%$ следует умножить табличное значение риска на отношение реальной эффективной дозы к типичному значению эффективной дозы (см. табл. 2) для этого вида медицинского исследования.

Для оценки риска от остальных медицинских исследований, не вошедших в Список 30, используют значения коэффициентов риска, рассчитанных на 1 мЗв эффективной дозы, представляющей собой усредненное значение для 4 выбранных анатомических областей тела (см. табл. 3). Проиллюстрируем это на примере рентген-стоматологических исследований. Оценим значение риска для мужчины 30 лет при выполнении ему исследования полного зубного статуса на ортопантомографе. Эффективная доза, рассчитанная согласно МУ 2.6.1.2944-11, составила 0,01 мЗв. В таблице 3 находим значение коэффициента риска на 1 мЗв эффективной дозы при выполнении исследования в области тела «голова» для пациента мужского пола 30 лет – $6,3 \cdot 10^{-5}$. Тогда значение риска для этого пациента будет равно $0,01 \cdot 6,3 \cdot 10^{-5} = 6,3 \cdot 10^{-7}$.

Значения рисков, так же, как и значения эффективных доз, могут быть использованы для информирования пациента о его дозе медицинского облучения и возможных последствиях (риске) для здоровья в связи с этим облучением в соответствии с требованиями законодательства⁵.

Дополнительно квалифицировать риск от конкретного медицинского исследования для пациента мужского или женского пола, принадлежащего тому или иному возрастному интервалу, можно в соответствии со следующей градацией риска [28, 29]:

- пренебрежимо малый – $< 10^{-6}$ (менее 1 случая на 1 млн человек);
- минимальный – $10^{-6} - 10^{-5}$ (от 1 до 10 случаев на 1 млн человек);
- очень низкий – $10^{-5} - 10^{-4}$ (от 1 до 10 случаев на 100 тыс. человек);
- низкий – $10^{-4} - 10^{-3}$ (от 1 до 10 случаев на 10 тыс. человек);
- умеренный – $10^{-3} - 3 \cdot 10^{-3}$ (от 1 до 3 случаев на 1 тыс. человек).

Так, вышеприведенный риск обследования на ортопантомографе можно квалифицировать как пренебрежимо малый. Кроме того, радиационный риск, связанный с проведением медицинского исследования, рекомендуется сравнивать с пожизненным риском спонтанной онкологической смертности и антропогенных (транспортных и бытовых) факторов риска для соответствующей возрастной группы и с риском возникновения осложнений, побочных эффектов или недостаточности диагностической информации при применении альтернативных методов диагностики (УЗИ, МРТ).

Заключение

Разработана методика оценки радиационного риска у пациентов, подвергающихся медицинским исследованиям в РФ, в основе которой лежат модели риска Публикации 103 МКРЗ, коэффициенты риска для российской популяции и результаты изучения доз облучения пациентов в РФ.

Значения пожизненного риска смерти с учётом вреда от снижения качества жизни по причине онкологического заболевания и наследственных эффектов варьируют в зависимости от пола и возраста пациента различным образом в зависимости от того, какие органы подвергаются облучению во время медицинского исследования. Путем деления соответствующих половозрастных рисков на эффективную дозу для каждого медицинского исследования были рассчитаны модифицированные значения половозрастных коэффициентов риска. Показано, что они для некоторых значений возраста, пола и исследования могут отличаться от номинальных коэффициентов риска МКРЗ, усредненных по возрасту и полу до порядка величины.

Для 30 исследований, определяющих около 80% коллективной дозы населения РФ от медицинского облучения, радиационный риск был рассчитан с использованием «золотого стандарта» – органных доз и соответствующих половозрастных коэффициентов риска для российской популяции, т.е. для этих исследований была выполнена лучшая оценка радиационного риска. Для остальных исследований (за исключением маммографии) использовали значения коэффициентов риска, рассчитанных

⁴ Методические рекомендации МР 2.6.1.0215-20 "Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенорадиологических исследований" (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 21 сентября 2020 г.) [Methodical guidelines MR 2.6.1.0215-20 "Assessment of the patient radiation risks from X-ray and nuclear medicine examinations" (In Russ.)]

⁵ Федеральный закон от 9 января 1996 г. № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» (Статья 17, п.2) [Federal state Law № FZ-3 "On the radiation safety of the public" (In Russ.)]

на 1 мЗв эффективной дозы, представляющей собой усредненное значение для 4 выбранных анатомических областей тела: голова, шея, грудная клетка и брюшная полость – таз. Предполагается, что для таких исследований погрешность оценки риска возрастет по отношению к погрешности оценки риска для вышеупомянутых 30 исследований не более чем на $\pm 30\%$.

Показаны различия в оценках риска у пациентов, связанные с использованием коэффициентов риска для российской и композитной популяции.

Литература

1. 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.
2. ICRP. Publication 105. Radiological protection in medicine. Ann. ICRP 37 (6); 2007. 63 p.
3. BSS (2014). International Atomic Energy Agency, Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, IAEA.
4. ICRP, 2021. Use of dose quantities in radiological protection. ICRP Publication 147. Ann. ICRP. 2021. 50(1).
5. Балонов М.И., Голиков В.Ю., Кальницкий С.А., Братилова А.А. Риск стохастических эффектов облучения вследствие рентгенографических исследований: зависимость от пола и возраста пациента // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2011. Т. 56, № 4. С. 71-79.
6. Wall B.F., Haylock R., Jansen J.T.M., et al. Radiation Risks from Medical X-ray Examinations as a Function of the Age and Sex of the Patient. Report HPACRCE-028. Health Protection Agency, Chilton. 2011.
7. Balonov M.I., Shrimpton P.C. Effective dose and risks from medical x-ray procedures. In: Proceedings of the First ICRP Symposium on the International System of Radiological Protection. Ann. ICRP. 2012. Vol. 41, No 3-4. P. 129-141.
8. Голиков В.Ю. Оценка рисков медицинского облучения на основе данных радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2015. Т.8, № 4. С. 6–14.
9. 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.
10. Голиков В.Ю., Балонов М.И., Кальницкий С.А. Уровни облучения пациентов при проведении рентгенологических исследований в Санкт-Петербурге и Ленинградской области // Радиационная гигиена. 2011. Т. 4, № 1. С. 5–13.
11. Братилова А.А., Голиков В.Ю., Кальницкий С.А. Уровни облучения пациентов при проведении рентгеновской компьютерной томографии в медицинских организациях Санкт-Петербурга и Ленинградской области // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 3. С. 33–38.
12. Балонов М.И., и др. Современные уровни медицинского облучения в России // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 3. С. 67–79.
13. Чипига Л.А., Звонова И.А., Рыжкова Д.В., и др. Уровни облучения пациентов и возможные пути оптимизации ПЭТ-диагностики в России // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 4. С. 31-43.
14. Голиков В.Ю., Водоватов А.В. Оценка значений рабочей нагрузки рентгеновских аппаратов при проведении рентгенологических процедур общего назначения // Радиационная гигиена. 2015. Т.8, №2. С. 6-10.
15. Vodovatov A.V., Golikov V.Yu., Kamyschanskaya I.G., et al. Estimation of the conversion coefficients from dose-area product to effective dose for barium meal examinations for adult patients // Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2018; 11(1):93-100.
16. Yakoumakis, et al. Evaluation of organ and effective doses during paediatric barium meal examinations using PCXMC 2.0 Monte Carlo code // Radiation Protection Dosimetry. 2015. Vol. 163, No 2. P. 202-209.
17. Damilakis J., et al. Normalized dose data for upper gastrointestinal tract contrast studies performed to infants // Medical Physics. 2006. No 33. 1033 p. doi: 10.1118/1.2181297
18. Livingstone, et al. Radiation dose to paediatric patients undergoing fluoroscopic examinations performed using digital imaging system // Radiography. 2008. No 14. P. 17-23.
19. Weir, et al. Radiation doses to children during modified barium swallow studies // Pediatric Radiology. 2007. No 37. P. 283–290.
20. Tapiovaara M., Siiskonen T. PCXMC—A Monte Carlo Program for Calculating Patient Doses in Medical X-Ray Examinations, second edn. Helsinki, Finland: Stateilyturvakeskus; 2008. STUK-A, 231.
21. Golikov V., Barkovsky A., Wallström E., Cederblad . A comparative study of organ doses assessment for patients undergoing conventional X-ray examinations: phantom experiments vs. calculations // Radiation Protection Dosimetry. 2018. Vol. 178, Issue 2. P. 223-234.
22. Lee C., Kim K.P., Bolch W.E., et al. NCICT: a computational solution to estimate organ doses for pediatric and adult patients undergoing CT // Journal of Radiological Protection. 2015. Vol. 35. P. 891–909.
23. Zvonova I., Chipiga L., Balonov M., Ermolina E. Nuclear Medicine Examinations of Children in Russia // Radiation Protection Dosimetry. 2015. Vol. 165, No 1-4. P. 216-219.
24. Ivanov V.K., Tsyb A.F., Mettler F.A., et al. Methodology for estimating cancer risks of diagnostic medical exposure: with an example of the risks associated with computed tomography // Health Physics. 2012. Vol. 103, No. 6. P. 732-739.
25. Kashcheev V.V., Pryakhin E.A., Menyaylo A.N., et al. Comparing risk estimates following diagnostic CT radiation exposures employing different methodological approaches // Health Physics. 2014. Vol. 106, No. 6. P. 806-811.
26. Методические рекомендации МР 2.6.1.0215-20 “Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенодиагностических исследований” (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 21 сентября 2020 г.)
27. Публикация 60 МКРЗ. Рекомендации Международной Комиссии по Радиационной защите 1990 года: пер. с англ. / под общ. ред. И.Б. Кеирим-Маркуса. М.: Энергоатомиздат, 1994. 208 с.
28. Department of Health. On the State of the Public Health 1995. In Introduction to the Annual Report of the Chief Medical Officer of the Department of Health for the year 1995. London, HMSO. 1995.
29. Calman K. Cancer: science and society and the communication of risk. British Medical Journal. 1996. No 313. P. 799-802.

Поступила: 11.06.2021 г.

Голиков Владислав Юрьевич – старший научный сотрудник, лаборатория радиационной гигиены медицинских организаций, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: sg235@rambler.ru

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

Чипига Лариса Александровна – научный сотрудник лаборатории радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Шацкий Илья Геннадьевич – научный сотрудник лаборатории радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Голиков В.Ю., Водоватов А.В., Чипига Л.А., Шацкий И.Г. Оценка радиационного риска у пациентов при проведении медицинских исследований в Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 3. С. 56-68. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-56-68

Evaluation of radiation risk for patients undergoing medical examinations in the Russian Federation

Vladislav Yu. Golikov, Aleksandr V. Vodovатов, Larisa A. Chipiga, Ilya G. Shatsky

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

The aim of the study was to develop a methodology for assessing radiation risk for patients undergoing medical examinations in the Russian Federation. The methodology is based on the risk model of the ICRP Publication 103, the coefficients of lifetime radiation risk for the Russian population and the results of evaluating the doses of patients in the Russian Federation. For thirty examinations that define about 80% of the collective dose of the population of the Russian Federation from medical exposure, the radiation risk was calculated using «gold standard», – the organ doses and the corresponding sex/age risk coefficients for the Russian population. For other examinations (with the exception of mammography) the values of the risk coefficients normalized on 1 mSv of effective dose, which is the averaged value for four selected anatomical areas of the body: head, neck, chest and abdominal cavity – pelvis, were used. It is assumed that for such examinations the error of risk assessment will increase relative to the error of risk assessment for the aforementioned 30 examinations not more than 30%. It is shown that risk estimates for some examinations calculated using the “gold standard” may differ from such estimates on the base of effective dose and nominal risk coefficients averaged by age and the sex to the order of magnitude.

Key words: medical examinations, patients, radiation risk, nominal risk coefficients, effective dose.

References

1. International Commission on Radiological Protection 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 Ann. ICRP. 2007. Vol. 37. P. 1–332.
2. ICRP. Publication 105. Radiological protection in medicine. Ann. ICRP. 2007. Vol. 37, No 6. 63 p.
3. BSS. International Atomic Energy Agency, Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, IAEA. 2014.
4. ICRP. Use of dose quantities in radiological protection. ICRP Publication 147. Ann. ICRP. 2021. Vol. 50, No 1.
5. Balonov M, Golikov V, Kalnitsky S, Bratilova A. Age and sex dependence of the stochastic health effects due to radiogra-

Vladislav Yu. Golikov

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

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

- phy. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost* = *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2011;56(4): 73-79 (In Russian).
6. Wall BF, Haylock R, Jansen JTM, Hillier MC, Hart D, Shrimpton PC. Radiation Risks from Medical X-ray Examinations as a Function of the Age and Sex of the Patient. Report HPACRCE-028. Health Protection Agency, Chilton; 2011.
 7. Balonov MI, Shrimpton PC. Effective dose and risks from medical x-ray procedures. In: Proceedings of the First ICRP Symposium on the International System of Radiological Protection. Ann. ICRP. 2012;41(3-4): 129-141.
 8. Golikov V. Medical exposure risk assessment based on the data of radiation-hygienic passportization in the regions of the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(4): 6-14 (In Russian).
 9. Golikov V, Balonov M, Kalnitsky S, Sarycheva S. Evaluation of patients doses during interventional radiological examinations. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(3): 26-31 (In Russian).
 10. Golikov V, Balonov M, Kalnitsky S, Bratilova A, Sarycheva S, Shatsky I, et al. Exposure levels of patients during radiological examinations in St. Petersburg and the Leningrad region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2011;4(1): 5-13 (In Russian).
 11. Bratilova A, Golikov V, Kalnitsky S. Exposure levels of patients during computed tomography in medical organizations of St. Petersburg and Leningrad region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(3): 33-38 (In Russian).
 12. Balonov M, et al. Modern levels of medical exposure in Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(3): 67-79 (In Russian).
 13. Chipiga L, et al. Levels of patient exposure and possible ways of PET diagnostics optimization in Russia. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(4): 31-43 (In Russian).
 14. Golikov VYu, Vodovotov AV. Estimation of an X-ray machine's workload during routine radiological examinations. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(2): 6-10 (In Russian).
 15. Vodovotov AV, Golikov VYu, Kamyshanskaya IG, Zinkevich KV, Bernhardsson C. Estimation of the conversion coefficients from dose-area product to effective dose for barium meal examinations for adult patients. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(1): 93-100. (In Russian).
 16. Yakoumakis, et al. Evaluation of organ and effective doses during paediatric barium meal examinations using PCXMC 2.0 Monte Carlo code. *Radiation Protection Dosimetry*. 2015;163(2): 202-209.
 17. Damilakis J, et al. Normalized dose data for upper gastrointestinal tract contrast studies performed to infants. *Medical Physics*. 2006;33: 1033. doi: 10.1118/1.2181297.
 18. Livingstone, et al. Radiation dose to paediatric patients undergoing fluoroscopic examinations performed using digital imaging system. *Radiography*. 2008;14: 17-23.
 19. Weir, et al. Radiation doses to children during modified barium swallow studies. *Pediatric Radiology*. 2007;37:283-290.
 20. Tapiovaara M, Siiskonen T. PCXMC—A Monte Carlo Program for Calculating Patient Doses in Medical x-Ray Examinations, second edn. Helsinki, Finland: Stateilyturvakeskus; 2008: STUK-A. 231.
 21. Golikov V, Barkovsky A, Wallström E, Cederblad A. A comparative study of organ doses assessment for patients undergoing conventional X-ray examinations: phantom experiments vs. calculations. *Radiation Protection Dosimetry*. 2018;178(2): 223-234.
 22. Lee C, Kim KP, Bolch WE, et al. NCICT: a computational solution to estimate organ doses for pediatric and adult patients undergoing CT scans. *Journal of Radiological Protection*. 2015;35: 891-909.
 23. Zvonova I, Chipiga L, Balonov M, Ermolina E. Nuclear Medicine Examinations of Children in Russia. *Radiation Protection Dosimetry*. 2015; 165(1-4): 216-219.
 24. Ivanov VK, Tsyb AF, Mettler FA, Menyaylo AN, Kashcheev VV. Methodology for estimating cancer risks of diagnostic medical exposure: with an example of the risks associated with computed tomography. *Health Physics*. 2012;103(6): 732-739.
 25. Kashcheev VV, Pryakhin EA, Menyaylo AN, Chekin SYu, Ivanov VK. Comparing risk estimates following diagnostic CT radiation exposures employing different methodological approaches. *Health Physics*. 2014;106(6): 806-811.
 26. Methodical Recommendation MR 2.6.1.0215-20 "Assessment of radiation risks of patients undergoing radiological examinations" (approved by Head State Sanitary Doctor of the Russian Federation 09/21/2020)
 27. International Commission on Radiological Protection. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3).
 28. Department of Health. On the State of the Public Health 1995. In Introduction to the Annual Report of the Chief Medical Officer of the Department of Health for the year 1995. London, HMSO; 1995.
 29. Calman K. Cancer: science and society and the communication of risk. *British Medical Journal*. 1996;313: 799-802.

Received: June 11, 2021

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

Aleksandr V. Vodovotov – PhD, researcher, head of the Medical protection laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

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

Ilya G. Shatsky – 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, Saint-Petersburg, Russia

For citation: Golikov V.Yu., Vodovotov A.V., Chipiga L.A., Shatsky I.G. Evaluation of radiation risk for patients undergoing medical examinations in the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No. 3. P. 56-68. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-56-68

Риск заболеваемости раком молочной железы у аварийно-облучённых лиц Южного Урала

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

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

Цель работы — оценить риск заболеваемости раком молочной железы у женщин Уральской когорты аварийно-облучённого населения. Когорта, объединяющая лиц, облучённых на Южном Урале на реке Тече и на Восточно-Уральском радиоактивном следе, была создана в 2018 г. Анализ риска рака молочной железы у женщин этой когорты проводится впервые. За период с 1956 по 2018 г. (741 533 человеко-лет под риском) на территории наблюдения за заболеваемостью зарегистрировано 337 случаев рака молочной железы. Средняя накопленная доза на молочную железу, рассчитанная по дозиметрической системе TRDS-2016, составила 46 мГр, максимальная — 1 Гр. Регрессионный анализ проводился с использованием программного пакета EPICURE. Статистическая значимость с 95% вероятностью оценивалась методом максимального правдоподобия. В результате анализа получена статистически значимая линейная зависимость показателей рака молочной железы от поглощённой дозы. Избыточный относительный риск за период наблюдения с 1956 по 2018 г. у членов женской субкогорты с использованием 5-летнего латентного периода составил 2,39 Гр. В статье также рассмотрено влияние доступных для исследования нерадиационных факторов как на базовые уровни заболеваемости раком молочной железы, так и на связанные с радиационным воздействием. Полученные результаты не противоречат таковым, полученным ранее в исследовании у женщин когорты реки Течи и у членов когорты LSS (выживших после атомной бомбардировки).

Ключевые слова: рак молочной железы, Уральская когорта аварийно-облучённого населения, радиогенный риск, избыточный относительный риск.

Введение

Актуальность изучения влияния ионизирующего излучения на происхождение рака молочной железы (РМЖ) определяется рядом важных причин. Во-первых, она обусловлена высокой распространённостью злокачественных новообразований (ЗНО) данной локализации, занимающей одно из ведущих мест как в структуре онкологической заболеваемости, так и в структуре онкологической смертности в общей популяции [1–4]. Во-вторых, актуальность определяется неоднозначностью результатов эпидемиологических исследований в различных популяциях облучённого населения [5–7].

На современном этапе развития радиобиологии особое значение приобретает детализация механизмов радиационного канцерогенеза для различных форм ЗНО при различных условиях радиационного воздействия [8–9], что, в свою очередь, делает необходимым использование различных эпидемиологических подходов, максимально учитывающих специфику изучаемой облучённой популяции, в том числе и в отношении нерадиационных факторов. Важно оценить роль и место радиационного фактора среди других причин, вызывающих развитие рака молочной железы. Для происхождения новообра-

зований молочной железы это, в первую очередь, могут быть факторы, связанные с гормональным статусом и особенностями функционирования репродуктивной системы женщины [10].

Целесообразно рассматривать в качестве потенциальной точки приложения действия ионизирующего излучения, помимо тканей самой молочной железы, также различные элементы эндокринной системы, по-разному влияющие на созревание и функционирование критического органа на различных этапах онтогенеза. Следует учитывать, что наиболее распространённые разновидности опухолей молочной железы — эпителиальные опухоли протоков и долей молочной железы — относятся к классическим гормон-обусловленным онкологическим заболеваниям [6, 7]. Таким образом, основная мишень для радиационного воздействия является также мишенью для гормонов, вырабатываемых яичниками, например, это могут быть эстрогены и прогестины.

В 103 публикации МКРЗ не рассматривается влияние наследственного фактора на коэффициент риска ЗНО при радиационном воздействии в малых дозах из-за малой доказательной базы к 2007 г. [8]. Однако, по последним данным, суммарный вклад различных наслед-

Крестинина Людмила Юрьевна

Уральский научно-практический центр радиационной медицины

Адрес для переписки: 454141, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: ludmila@urcrm.ru

ственных факторов в происхождение опухолей молочной железы достигает 15–20% [11]. Кроме того, описаны разновидности ЗНО молочной железы, способные с высоким риском передаваться напрямую от родителей дочерям, прежде всего, это новообразования, обусловленные мутациями генов BRCA1 и BRCA2, TP53, CHEK 2 [12].

В японской когорте LSS, выживших после атомной бомбардировки [6], наблюдали увеличение заболеваемости РМЖ чрез 10 лет после взрыва и воздействия высоких доз на население. Величина и мощность дозы, возраст начала облучения, острый или хронический характер облучения и сочетание с воздействием нерадиационных факторов могут значительно влиять на показатели риска заболеваемости РМЖ, поэтому изучение радиационного риска в других когортах, отличающихся по вышеуказанным факторам, имеет важное значение для разработки профилактических мер данного заболевания.

Предыдущий анализ риска РМЖ проводился нами в когорте женщин численностью около 10 тысяч человек, облучённых на реке Тече за период с 1956 по 2002 г. [13]. Оценка величины радиационного риска была предварительной в связи с продолжавшейся работой по совершенствованию дозиметрической системы. В данной работе мы оценили величину избыточного относительного риска заболеть РМЖ, связанного с воздействием дозы, среди женщин численностью более 25 тысяч человек, облучённых на Урале в 1950-е гг., а также оценили роль влияния факторов нерадиационной природы. В исследовании значительно увеличился период наблюдения и были усовершенствованы оценки доз.

Материалы и методы

В 2018 г. была сформирована Уральская когорта аварийно-облучённого населения, объединившая лиц, облучённых на Южном Урале: на реке Тече и на Восточно-Уральском радиоактивном следе (ВУРС) в 1950-е гг. Критерии включения описаны ранее [14]. При анализе онкологической заболеваемости численность когорты ограничивается годом начала наблюдения и территорией наблюдения за заболеваемостью.

Период наблюдения начинается с 1956 г., что связано с началом регистрации новообразований в Челябинском онкологическом диспансере с 1956 г. на постоянной основе. В связи с этим в когорту заболеваемости не включаются более трех тысяч человек с жизненным статусом до 1956 г. (умершие или потерянные), а также исключаются лица, заболевшие ЗНО до 1956 г.

Территория наблюдения за заболеваемостью (ТНЗ), мониторинг на которой был доступен на весь 63-летний период наблюдения, включает 5 районов Челябинской области (Каслинский, Кунашакский, Красноармейский, Аргашский и Сосновский), по которым протекала река Теча и которые включали территорию ВУРСа, а также места массовой миграции – г. Челябинск и г. Озерск. В связи с ограничением по территории из когорты были исключены еще 7437 человек, которые начиная с 1956 г. не проживали на ТНЗ. Большую часть из них составили жители прибрежных сел в Курганской области. Третьим этапом из сформированной когорты были выбраны женщины.

Таким образом, численность женской субкогорты для анализа заболеваемости РМЖ составила 25 855 человек.

В таблице 1 представлены демографические характеристики женской субкогорты для анализа заболеваемо-

Демографические характеристики женской субкогорты и случаев РМЖ за 1956–2018 гг.

Таблица 1

Demographic characteristics of the female subcohort and breast cancers for 1956–2018]

[Table 1

Характеристики [Characteristics]	Человек [Persons]		Случаи рака молочной железы на ТНЗ [Breast cancers on the catchment area]	
	n	%	n	%
Всего [Total]	25 855	100	337	100
Возраст начала облучения, лет [Age at exposure beginning, years]				
0–9	8416	33	123	37
10–14	2115	8	44	13
15–19	2129	8	32	9
20–39	7177	28	120	36
≥40	6018	23	18	5
Дозовые группы, Гр (накопленная доза на молочную железу) [Dose groups, Gy (cumulative breast dose)]				
0–<0,010	12 786	49	138	41
0,010–<0,050	7883	30	106	31
0,050–<0,100	2749	11	45	13
0,100–<0,200	1168	5	17	5
0,200–<0,300	431	2	9	3
0,300–<0,500	492	2	14	4
0,500≥	346	1	8	2

Характеристики [Characteristics]	Человек [Persons]		Случаи рака молочной железы на ТНЗ [Breast cancers on the catchment area]	
	n	%	n	%
Национальность [Ethnicity]				
Татары и башкиры [Tatars and Bashkirs]	9327	36	120	36
Русские [Russians]	16 528	64	217	64
Факт облучения родителей [The fact of parental exposure]				
Родители не облучены [Not exposed parents]	21 243	82	277	82
Родители облучены [Exposed parents]	1799	7	18	5
Облучение матери во время беременности [mother exposed during pregnancy]	2813	11	42	12
Авария, приведшая к облучению [Accident of exposure]				
Только река [Techa only]	13659	53	208	62
Река+ВУРС [Techa +EURT]	1150	4	26	8
Только ВУРС [EURT only]	11 046	43	103	30

сти и распределение случаев РМЖ, зарегистрированных у женщин на ТНЗ.

Около половины членов изучаемой когорты (49%) на момент облучения были в возрасте до 20 лет. А в возрасте до 15 лет, включавшем периоды активного формирования молочной железы, получили облучение 41% женщин, среди которых было зарегистрировано около 50% (167 из 337) всех случаев РМЖ.

Доля татар и башкир составляет 36% от всей субкогорты, а 64% составляет русское население (представители других этнических групп составляют менее 1%). Доля РМЖ в этих этнических группах аналогична доле населения.

Среди всех облучённых женщин 82% составляли женщины, родители которых не были облучены до их рождения, 11% женщин были облучены внутриутробно и 7% родились после облучения родителей.

53% членов анализируемой субкогорты получили облучение на реке Тече, 43% – на ВУРСе, 4% получили облучение, попав в обе ситуации. Жителей деревни Метлино, ближайшей к месту сброса отходов в реку Течу и получивших наибольшие дозы среди облучённых на реке, в 1956 г. переселили на чистую территорию (новый «посёлок Метлино»), которая позже попала под радиоактивный след, поэтому большинство членов когорты, облучённых в двух авариях, получили максимальные дозы.

За весь период у членов изучаемой когорты было зарегистрировано на ТНЗ 337 случаев РМЖ.

Доза

При анализе заболеваемости раком молочной железы использована доза, накопленная в молочной железе за 63-летний период наблюдения. Индивидуальные дозы для членов женской субкогорты были рассчитаны по усовершенствованной дозиметрической системе TRDS-2016

[15] сотрудниками биофизической лаборатории УНПЦ РМ. Рассчитанная доза включает дозу как от внутреннего, так и от внешнего облучения и у большинства членов субкогорты обусловлена вкладом долгоживущих радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs .

Средняя доза на молочную железу за весь период наблюдения для членов женской субкогорты составила 46 мГр, а с учётом 5-летнего латентного периода – 43 мГр, максимальная – 1,0 Гр.

На рисунке 1 представлено дозовое распределение членов женской субкогорты по дозовым группам (используемым в анализе) и величины грубых коэффициентов заболеваемости раком молочной железы (ГКЗ РМЖ). Слева по вертикальной оси указано число человек в дозовых группах, а на вертикальной оси справа – ГКЗ РМЖ в этих группах.



Рис. 1. Дозовое распределение членов женской субкогорты и грубые коэффициенты заболеваемости раком молочной железы в дозовых группах

[Fig. 1. Dose distribution of female subcohort members and gross incidence rates of breast cancer in dose groups]

Можно видеть, что половина членов субкогорты (50%) получили дозу на МЖ менее 10 мГр, среди них было зарегистрировано на ТНЗ 138 РМЖ (около 41%). Всего дозу в диапазоне малых доз (до 100 мГр) получили около 91% членов субкогорты, среди них было зарегистрировано 289 (86%) случаев РМЖ. У членов субкогорты (около 10%), получивших дозу от 100 мГр до 1 Гр, было зарегистрировано на ТНЗ 48 случаев (14%) РМЖ. Линейный график грубых коэффициентов заболеваемости РМЖ по дозовым группам показывает тенденцию увеличения грубого КЗ РМЖ с увеличением дозы после 200 мГр.

Жизненный статус

Длительный период наблюдения за членами когорты (63 года) позволил увеличить число человеко-лет до 741 533. За этот период к концу 2018 г. остаются живы и проживают на территории наблюдения за заболеваемостью 5278 человек, они составляют 27% от всех немигрантов (табл. 2). Из них 5174 человека не имеют диагноза РМЖ, а у 104 зарегистрирован РМЖ. Из общего числа немигрантов за весь период умерло 59% (11 787 человек). Для 90% умерших причина смерти подтверждена документально.

2751 человек были потеряны на территории наблюдения (адрес этих людей известен на дату ранее 31.12.2018 г.). В период с 1956 по 2018 г. за пределы ТНЗ мигрировало более 6000 человек, которые составили 24% от анализируемой субкогорты женщин. Необходимо подчеркнуть, что у каждого человека есть дата прибытия и выбытия с ТНЗ, поэтому в анализ риска включаются случаи и человеко-годы только в те периоды, когда человек проживал на ТНЗ. Поэтому мигранты с ТНЗ и потерянные на ТНЗ ранее конца периода наблюдения тоже участвуют в анализе в периоды проживания на ТНЗ. Можно видеть, что 5 случаев РМЖ зарегистрировано у потерянных из наблюдения к концу 2018 г., а 7 случаев у мигрировавших до 2018 г. включены в анализ, т.к. были зарегистрированы во время проживания человека на ТНЗ. Случаи РМЖ, зарегистрированные у членов

изучаемой когорты за пределами ТНЗ, не включаются в анализ, т.к. их сбор носит не системный характер и они не показаны в таблице 2.

Исключение из анализа лиц после точной даты выбытия из наблюдения является цензурированием и минимизирует вероятность смещения оценок риска из-за процессов движения в когорте.

Методы статистического анализа

Простая параметрическая модель избыточного относительного риска (ИОР) использована для анализа риска заболеваемости РМЖ методом Пуассоновской регрессии. Для расчёта использована программная оболочка EPICURE (программы «DATAB» и «AMFIT») [16].

Данные для анализа были стратифицированы по следующим параметрам:

- национальность (русские или татары и башкиры);
- факт эвакуации (да, нет);
- календарный период (были рассмотрены категории по 10 лет (начиная с 1956 по 2006 г. и после 2006 г.), а также период наблюдения с разбивкой на 2 категории: до 1986 г. или после и до 1991 г. и после;
- возраст начала облучения (0–4, 5–9, 10–14, 15–19, 20–39, 40–59, 60>);
- достигнутый возраст (от 0 до 80 и старше по 20-летним категориям);
- год рождения членов когорты (до 1931 г. или после);
- дозовые категории на молочную железу (с нижними границами 0; 0,002; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,25; 0,5 Гр) и категории дозы с учётом латентного периода в 2, 5, 10, 15 лет (с теми же нижними границами);
- городской/сельский житель (городской – если прожил в городе 10 и более лет);
- 3 категории в зависимости от причины облучения (1 – только река Теча; 2 – река + ВУРС, 3 – только ВУРС);
- 3 категории статуса облучения родителей (не облучены, мать облучена во время беременности, облучены);
- 2 категории – рожавшие или нерожавшие;

Жизненный статус членов субкогорты к 31.12.2018 г.

Таблица 2

Vital status of the subcohort members as of 31.12.2018]

[Table 2

Жизненный статус [Vital status]	Человек [Persons]		РМЖ на ТНЗ* [Breast cancers on the CA]		Человек без РМЖ [Persons without breast cancer]	
	n	%	n	%	n	%
Жив [Alive]	5278	27%	104	32	5174	27
Умер [Deceased]	11 787	59	221	67	11 566	59
В том числе причина смерти: [Including cause of death:]						
известна [is known]	10 597	90	214	97	10 383	90
не известна [is unknown]	1190	10	7	3	1183	10
Потерянные из наблюдения [Lost of follow-up]	2751	14	5	2	2746	14
Всего на ТНЗ [Total on the catchment area]	19 816	100	330	100	19 486	100
Мигранты [Migrants]	6039	23	7	2	6032	24
Всего [Total]	25 855	100%	337	100%	25 518	100%

* ТНЗ [CA] – территория наблюдения за заболеваемостью [incidence catchment area].

- 3 категории – рак у ближайших родственников любой локализации (нет данных о родственниках, есть рак у родственников, нет рака у родственников);
- 3 категории – рак МЖ у ближайших родственников (нет данных о родственниках, есть РМЖ, нет РМЖ);
- 3 категории наличия у ближайших родственников РМЖ или рака простаты (РП) (нет данных о родственниках, есть РМЖ или РП, нет РМЖ или РП);
- 4 категории индекса массы тела (ИМТ): истощение, норма или пограничные состояния, ожирение, нет данных.

Доверительные интервалы с 95% вероятностью рассчитывались методом вероятного правдоподобия.

Формула простой параметрической модели имела вид:

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

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

$\lambda_0(a, z_0)$ – базовый уровень риска,

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

$ERR(d, z_1)$ – избыточный относительный риск, моделируемый как

$$ERR(d, z_1) = \rho(d)\varepsilon(z_1) \quad (2)$$

где $\rho(d)$ – функция дозового ответа,

$\varepsilon(z_1)$ функция модификации эффекта от факторов (z_1), которые могут модифицировать ИОР.

Результаты и обсуждение

Исследование зависимости коэффициентов заболеваемости РМЖ от нерадиационных факторов в женской субкогорте

Все перечисленные факторы, указанные в стратах, как зависимые, так и не зависимые от времени, были рассмотрены при моделировании базовых показателей как факторы, которые могли повлиять на величину заболеваемости РМЖ. Поскольку одновременное включение в модель всех указанных факторов с множеством категорий будет создавать избыточное дробление показателей, их влияние было проанализировано в различных сочетаниях.

Необходимо отметить, что для части факторов (индекс массы тела, рак у ближайших родственников) информация

была доступна не для всех членов когорты, поэтому для этих факторов одна из категорий включала лиц с неизвестной информацией. Факторы с ограничением информации не включались в модель базовых уровней, которые должны были характеризовать всю когорту. Их влияние мы могли учесть только при сравнении эффекта отдельных выборок. Множественные категории, организованные в стратах при оценке влияния на базовые уровни, могли укрупняться (например, период наблюдения или возрастные категории).

В результате анализа нами был выбран вариант статистически значимой зависимости базовых показателей заболеваемости РМЖ от следующих параметров: национальность ($p=0,003$), год рождения членов когорты (до 1931 и после) ($p<0,001$), период наблюдения (до 1986 г. и после) ($p=0,05$), факт рождения детей ($p<0,08$), логарифмическая зависимость от достигнутого возраста ($p<0,001$).

Базовые показатели заболеваемости за весь период наблюдения у русских почти в 1,4 раза превышают таковые у татар и башкир, в период после 1986 г. показатели в 1,6 выше, чем до 1986 г., у родившихся после 1931 г. показатели в 1,3 раза выше, чем до 1931 г., у женщин в возрасте 60 лет показатели выше, чем в более раннем возрасте более чем в 4 раза.

Дозовая зависимость

Исследование влияния минимального латентного периода

Величины ИОР были рассчитаны при использовании различных минимальных латентных периодов (0, 2, 5, 10, 15 лет), необходимых для реализации ЗНО после радиационного воздействия (табл. 3). Можно видеть, что величины ИОР и их статистическая значимость почти не отличаются при минимальных латентных периодах, равных 0, 2 и 5 лет а также периодах в 10 и 15 лет. Для лучшей сопоставимости с другими исследованиями мы в дальнейшем используем 5-летний минимальный латентный период.

Характер дозовой зависимости

Исследование влияния дозы на заболеваемость РМЖ у женщин УКАОН за период наблюдения с 1956 по 2018 г. показало статистически значимый линейный дозовый ответ, величина ИОР/Гр с 5-летним минимальным латентным периодом составила 2,39 (95% ДИ: 0,83; 4,52), $p<0,001$ (см. табл. 3).

Сравнение показателей ИОР при разных латентных периодах и моделях

Таблица 3

[Table 3]

Comparative ERR indicators with different latency periods and models]

Латентный период, лет [Latency period, years]	ИОР/Гр [ERR/Gy]	95% ДИ [CI]	P	Избыточные РМЖ [Excessive breast cancer]	AIC*	Атрибутивный риск [Attributive risk] %
Линейная модель [Linear model]						
0	2,33	0,79; 4,44	<0,001	31,5	3939,772	9,3
2	2,34	0,79; 4,46	<0,001	31,5	3939,701	9,4
5	2,39	0,83; 4,52	<0,001	31,8	3939,387	9,4
10	2,45	0,85; 4,62	<0,001	31,7	3939,301	9,4
15	2,48	0,86; 4,66	<0,001	31,0	3939,219	9,2

Окончание таблицы 3

Латентный период, лет [Latency period, years]	ИОР/Гр [ERR/Gy]	95% ДИ [CI]	P	Избыточные РМЖ [Excessive breast cancer]	AIC*	Атрибутивный риск [Attributive risk] %
Линейно-квадратичная модель [Linear-quadratic model]						
Линейный компонент [linear component]	1,79	-1,60;5,94	0,36	28,5	3941,263	8,4
Квадратичный компонент [quadratic component]	1,30	-5,69;8,92	>0,5			
Квадратичная модель [Quadratic model]						
5	4,52	1,40; 8,90	0,001	15,54	3940,244	4,6

*AIC- информационный критерий Акаике для выбора моделей [Akaike information criterion for model selection].

Добавление квадратичного компонента к линейному (линейно-квадратичная модель) подгонку модели не улучшило ($p>0,5$), ИОР/Гр = 3,09,

Использование квадратичной зависимости при анализе эффектов показало значимую величину ИОР, равную 4,52/Гр (95% ДИ: 1,40; 8,90), $p=0,001$. При этом показатель AIC (Информационный критерий Акаике) [17], применяющийся для выбора из нескольких статистических моделей при регрессионном анализе, был несколько выше (3940, 244), чем в линейной модели, и указывал на преимущество линейной модели (рис. 2).

Атрибутивный риск

В таблице 4 представлено распределение человеко-лет и наблюдаемых на ТНЗ случаев РМЖ по дозовым категориям, а также рассчитанные по линейной модели с 5-летним минимальным латентным периодом избыточные случаи РМЖ и атрибутивный риск.

Начиная с дозовой группы свыше 20 мГр, атрибутивный риск (доля избыточных случаев, рассчитанных по модели, от наблюдаемых случаев в группе) составляет более 5%, достигая в наибольшей группе 70%. Согласно линейной модели за весь период наблюдения, 32 случая из 337 РМЖ могут быть связаны с воздействием дозы, атрибутивный риск составил 9,5%.

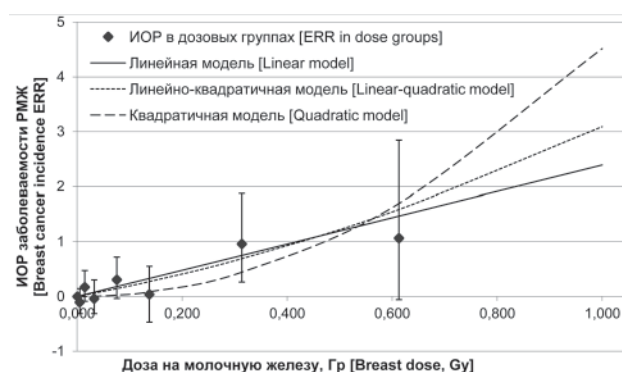


Рис. 2. Дозовая зависимость избыточного относительного риска заболеваемости раком молочной железы при разных моделях (сплошная линия – линейная модель, мелкий штрих – линейно-квадратичная, крупный штрих – квадратичная модель)

[Fig. 2. Dose dependence of breast cancer incidence excess relative risk in different models (solid line – linear model, small dash – linear-quadratic, large dash – quadratic model)]

Модификация эффекта

В таблице 5 представлены величины ИОР на 1 Гр с 95% доверительными интервалами, рассчитанными по линейной модели в каждой из исследуемых групп, а так-

Распределение избыточных случаев и атрибутивного риска по дозовым группам

Таблица 4

[Table 4]

Distribution of excess of breast cancer cases and attributive risk by dose groups]

Дозовые группы, мГр [Dose groups, mGy]	Человеко-годы [Person-years]	РМЖ [Breast cancers]	Атрибутивный риск, % [Attributive risk, %]	Избыточные случаи РМЖ [Excess of breast cancers]
0–2	225 286	80	0,2%	0,1
2–10	140 448	59	1,4%	0,8
10–20	125 419	67	3,0%	2,0
20–50	87 109,5	38	7,8%	3,0
50–100	88 013,6	46	14,1%	6,5
100–200	37 868,1	16	31,4%	5,0
200–500	29 145,5	23	38,3%	8,8
500 >	8243	8	70,5%	5,6
Вся когорта [Total]	741 533	337	9,5%	31,8

Величины ИОР в различных группах женской субкогорты

Таблица 5

[Table 5]

ERR values in different groups of the female subcohort

Параметры [Parameters]	Средняя доза [Mean dose]	ИОР/Гр (95% ДИ) [ERR/Gy (95% CI)]	p	Человеко-годы [PYR]	ПМЖ [Breast cancer]	Атрибутивный риск [Attributive risk]
Все женщины [Total female]	0,043	2,39 (0,83; 4,52)	<0,001	741 533	337	9,4%
Татары и башкиры [Tatars & Bashkirs]	0,050	0,76 (-1,59; 4,33)	>0,5	323 432	120	4,0%
Русские [Russian]	0,037	3,08 (1,09;5,94)	<0,01	418 101	217	10,5%
Эвакуированы [Evacuated]	0,085	2,48 (0,87;4,69)	<0,01	303 642	135	19,3%
Не эвакуированы [Nonevacuated]	0,013	13,22 (4,18;25,7)	<0,01	437 891	202	2,9%
Календарный период [Calendar period]						
< 1986	0,042	2,80 (-0,13; 8,31)	0,16	456 240	67	12,2%
1986 >	0,044	2,27 (0,56;4,71)	0,03	285 293	270	8,7%
Статус облучения родителей [Parents exposure status]						
Не облучены [Nonexposed]	0,050	2,46 (0,85;4,66)	0,01	569 293	277	10,5%
Облучены [Exposed]	0,019	1,45 (-2,93;8,78)	>0,5	172 240	60	3,5%
Территория облучения на реке Тече или на ВУРСе [Area of exposure on the Techa River or EURT]						
Все облученные на реке [All exposed on the river]	0,059	2,41 (0,84;4,55)	0,01	490 822	234	12,5%
Только ВУРС [EURT only]	0,011	1,04 (-4,78;9,99)	>0,5	250 291	103	1,3%
Городской/сельский житель [Urban/rural]						
Городской [Urban]	0,042	2,45 (0,47;5,27)	0,03	483 960	205	9,8%
Сельский [Rural]	0,043	2,33 (0,35; 5,20)	<0,05	257 573	132	9,4%
Возраст начала облучения, лет [Age at exposure, years old]						
10		2,55 (0,82; 4,94)	0,02			
40		1,93 (0,14; 5,76)	0,25			
Достигнутый возраст, лет [Attained age, years]						
40		4,23 (0,53; 11,99)	<0,05			
60		2,31 (0,69; 4,45)	0,02			
Рак у родственников [Cancer in relatives]						
Есть ПМЖ [Have breast cancer]	0,050	16,3 (5,60;32,4)	0,01	29 060	26	40%
Нет ПМЖ [No breast cancer]	0,040	1,79 (0,32;3,9)	0,05	679 143	290	7,4%
Есть рак простаты и МЖ [Have prostate & breast cancers]	0,050	13,09 (4,50;25,9)	0,01	42 307	33	34,5%
Нет рака простаты и МЖ [No prostate & breast cancers]	0,040	1,76 (0,30;3,8)	0,05	665 896	283	7,3%
Нет данных о родственниках [No data of relatives]	0,030	7,79 (-1,95;25,5)	0,212	33 330	21	17%
Факт рождения ребёнка [The fact of having childbirth]						
Рожавшие [giving birth]	0,046	2,22 (0,62;4,48)	0,03	597 485	265	9,5%
Нерожавшие + нет сведений о детях [nulliparous +no information]	0,027	3,48 (-0,48-10,83)	0,18	144 048	72	9,5%
Индекс массы тела [Body mass index]						
Истощение <16 [exhaustion]	0,077	14 (-4,29;65,96)	0,39	1926	2	50%
Норма 16–30 [Norm]	0,074	0,8 (-0,84;3,46)	0,45	182 298	82	4,7%
Ожирение >=30 [Obesity]	0,072	4,82 (1,7;9,22)	<0,01	132 492	79	23,0%
Неизвестно 0 [Unknown]	0,05	1,84 (-0,28;5,11)	0,21	424 816	174	5,0%

же средняя доза на молочную железу, с 5-летним лагом, количество случаев РМЖ и атрибутивный риск.

Необходимо отметить, что значимые различия в заболеваемости РМЖ, не связанные с дозой, уже учтены при расчёте базовых уровней по следующим показателям: национальной принадлежности, календарному периоду, достигнутому возрасту, году рождения членов когорты (до 1931 г. или позже), факту рождения детей.

Величина избыточного относительного риска заболеваемости РМЖ у русских женщин является статистически значимой и выше, чем у татар и башкир (3,08 и 0,76 соответственно), но различия не значимы.

Показатели риска в зависимости от факта эвакуации достоверны в обеих группах и выше у неэвакуированного населения, хотя различия не достоверны. Календарный период до 1986 г. и после не оказал значимого влияния на величину ИОР, при этом наблюдается тенденция к увеличению радиационного риска заболеть РМЖ после 1986 г. (см. табл. 5).

Различия в величине ИОР у лиц с облучёнными и необлучёнными родителями статистически незначимы. При этом точечная оценка ИОР/Гр (2,46, $p=0,01$) значима только в группе с необлучёнными родителями и выше таковой (1,45, $p>0,5$) у лиц, являющихся потомками или облучёнными внутриутробно. При этом средняя доза на РМЖ у потомков ниже почти в 2,5 раза.

Величина ИОР заболеваемости РМЖ у облучённых в более молодом возрасте (в 10 лет) статистически значима и выше (2,55, $p=0,02$), чем у облучённых в возрасте 40 лет (1,93, $p=0,25$), но показатель для 40 лет не значим, и соответственно, различия не значимы.

При достижении 40-летнего возраста статистически значимая величина ИОР/Гр 4,23 (95% ДИ: 0,53; 11,99) выше таковой при достижении 60-летнего возраста ИОР/Гр (95% ДИ 0,69; 4,45), но различия не являются статистически значимыми.

Величина ИОР 2,41/Гр у женщин, облучённых на реке (средняя доза 0,059 Гр), выше, чем у женщин, получивших облучение только на ВУРСе (средняя доза 0,011 Гр, ИОР=1,04/Гр), но отличия не значимы, при этом и сама величина ИОР на ВУРСе статистически не значима.

Величина риска у городских и сельских жителей (2,45 Гр и 2,33 Гр) почти не различается, как и доза и величина атрибутивного риска (9,8 и 9,4%).

Мы также смогли оценить величину ИОР в зависимости от наличия рака у родственников 1-й степени родства (родители, дети, братья и сестры). Отдельно была выделена группа лиц, у которых не было установлено родственников (2444 женщины). У них величина ИОР была незначима и имела большие неопределённости. Среди остальной части женщин ИОР заболеваемости РМЖ у тех, которые не имели родственников с РМЖ, составил 1,79(0,32; 3,9), а у тех, у которых были родственники с РМЖ, ИОР/Гр был достоверно выше и составил 16,3(5,6; 32,4). Также мы сравнили величины ИОР у лиц, которые имели родственников с раком молочной железы и раком простаты, с теми, у которых родственники не болели. Величина ИОР/Гр была достоверно выше у женщин, которые имели родственников 1-й степени родства с этими раками, относительно тех, у кого родственники не болели, был получен ИОР/Гр 13,09 (4,5; 25,9) и 1,76 (0,3; 3,8). Данные результаты показывают не только наличие форм

с наследственной предрасположенностью к РМЖ, но также и большую чувствительность этих форм РМЖ к воздействию радиации.

Предварительная оценка ИОР в зависимости от индекса массы тела и от факта рождения ребёнка была рассчитана нами с помощью расчёта ИОР в разных категориях. При этом одна из категорий в каждом параметре включала лиц с неизвестной информацией. Для расчёта ИОР в зависимости от индекса массы тела мы выделили следующие категории: 1) истощение; 2) норма и пограничные состояния; 3) ожирение; 4) нет данных. Нами была рассчитана величина ИОР в зависимости от индекса массы тела. В группе с истощением ($ИМТ<16$) наблюдалось всего 2 случая РМЖ и около 2000 человеко-лет за 63-летний период, поэтому величина ИОР была незначима и с очень большим доверительным интервалом. А при сравнении ИОР в группе с нормальным и пограничным весом ($ИМТ$ от 16 до 30), ИОР/Гр 0,8 (-0,84; 3,46) и с ожирением ($ИМТ > 30$), ИОР/Гр 4,82 (1,7; 9,22) наблюдалось достоверное увеличение ИОР в группе с ожирением. В группе с неизвестной информацией величина ИОР занимала промежуточное положение между последними двумя категориями.

Для оценки зависимости ИОР от факта рождения ребёнка были выделены 2 категории: 1) рожавшие 2) нерожавшие или нет информации о рождении детей. Величина ИОР в группе рожавших 2,22 (0,62–4,48) была значимой и меньше таковой среди нерожавших, различия были не значимы, как и сами значения ИОР в группе у нерожавших.

Заключение

Численность женской субкогорты для анализа заболеваемости РМЖ составила 25 855 человек, число человеко-лет под риском – 741 533, за период с 1956 по 2018 г. было зарегистрировано 337 случаев РМЖ. Сотрудниками биофизической лаборатории УНПЦ РМ на основе дозиметрической системы TRDS-2016 были рассчитаны индивидуальные дозы на молочную железу. Средняя доза, накопленная за весь период наблюдения, составила 43 мГр с учетом 5-летнего латентного периода, максимальная – 1,0 Гр.

Предыдущие исследования риска солидных ЗНО в УКАОН, проведённые в 2020 г. [14], показали статистически значимую линейную зависимость от дозы. В данной работе впервые проведена оценка ИОР заболеваемости РМЖ у женщин УКАОН, а также зависимость от некоторых нерадиационных факторов. Установлено, что ИОР заболеваемости РМЖ имеет линейную зависимость от дозы и равен 2,39 Гр. Также получены данные о связи избыточного риска с фактом наличия РМЖ у родственников 1-й степени родства, а также с наличием рака МЖ или рака простаты у родственников 1-й степени родства.

Выявлены тенденции к более высоким показателям риска у русского населения относительно татар и башкир; у неэвакуированного населения относительно эвакуированного; у лиц, облучённых на реке, относительно облучённых на ВУРСе; у лиц, облучённых в более молодом (10-летнем) возрасте, относительно более старших (40-летних) групп. Получена достоверная зависимость величины ИОР заболеваемости РМЖ от факта ожирения.

Сравнение с другими популяциями не всегда корректно из-за различия в фоновых уровнях заболеваемости.

Тем не менее, полученные данные сопоставимы с данными в японской когорте LSS [18]. Точечная величина ИОР/Гр без учета модификации в УКАОН несколько выше, чем в когорте LSS (2,39; ДИ: 0,83; 4,52 и 0,87; ДИ: 0,55–1,3 соответственно), но и диапазон доверительного интервала шире (что указывает на большие неопределенности в УКАОН в связи с меньшей выборкой и меньшими дозами, чем в когорте LSS), и доверительные интервалы пересекаются, поэтому различия в величине ИОР в двух когортах статистически не значимы.

В ближайшее время мы планируем также провести исследование типа «случай – контроль», чтобы оценить влияние ряда других нерадиационных факторов на заболеваемость РМЖ.

Благодарности

Работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года».

Выражаем благодарность коллективу биофизической лаборатории УНПЦ РМ, возглавляемому кандидатом технических наук М.О. Дегтевой за расчёт индивидуальных доз на молочную железу у облучённого населения, а также коллективу отдела Базы данных «Человек», возглавляемому Н.В. Старцевым, за обеспечение прослеживания жизненного статуса и причин смерти членов когорты за длительный период.

Литература

- MacMahon B. Epidemiology and the causes of breast cancer // International Journal of Cancer. 2006. Vol. 118, No. 10. P. 2373–2378.
- Siegel R., Ma J., Zou Z., Jemal A. Cancer statistics, 2014 // CA A Cancer Journal for Clinicians. 2014 Jan-Feb. Vol. 64(1). P. 9–29. <https://doi.org/10.3322/caac.21208>.
- DeSantis C.E., Bray F., Ferlay J., et al. International Variation in Female Breast Cancer Incidence and Mortality Rates // Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention. 2015 Oct. Vol. 24, No 10. P. 1495–506. <https://doi.org/10.1158/1055-9965>.
- Чеснокова Н.П., Барсуков В.Ю., Злобнова О.А. Рак молочной железы: проблемы патогенеза // Фундаментальные исследования. 2012. Т. 4, № 1. С. 146–151.
- Cardis E., Vrijheid M., Blettner M., et al. Risk of cancer after low doses of ionising radiation: retrospective cohort study in 145 countries. // British Medical Journal. 2005. Vol. 331. P. 77–80.
- Land C.E., Tokunaga M., Koyama K., et al. Incidence of female breast cancer among atomic bomb survivors, Hiroshima and Nagasaki, 1950–1990. // Radiation Research. 2003. Vol. 160, No. 6. P. 707–717.
- Preston D.L., Mattsson A., Holmberg E., et al. Radiation effects on breast cancer risk: a pooled analysis of eight cohorts. // Radiation Research. 2002. Vol. 158, No. 2. P. 220–235.
- ICRP (2007). Recommendations of the ICRP. International Commission on Radiological Protection, Publication 103. Vol. 37. P. 2–4.
- NAS/NRC, 2006. Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII Phase 2. Board on Radiation Effects Research. National Research Council of the National Academies, Washington, D.C.
- Henderson B.E., Ross R.K., Pike M.C., Casagrande J.T. Endogenous hormones as a major factor in human cancer // Cancer Research. 1982. Vol. 42, № 8. P.3232–3239.
- Имянитов Е.Н. Наследственный рак молочной железы // Практическая онкология. 2010. Т. 11, № 4. С. 258–265.
- Lakhani S.R., van de Vijver M.J., Jacquemier J., et al. The pathology of familial breast cancer: predictive value of immunohistochemical markers estrogen receptor, progesterone receptor, HER-2, and p53 in patients with mutations in BRCA1 and BRCA2 // Journal of Clinical Oncology. 2002. Vol. 20, № 9. P. 2310–2318.
- Остроумова Е.В., Престон Д.Л., Рон И., и др. Заболеваемость раком молочной железы в когорте женщин, подвергшихся хроническому радиационному воздействию в населённых пунктах на реке Тече // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2010. Т. 5, № 3. С. 37–47.
- Крестинина Л.Ю., Силкин С.С., Микрюкова Л.Д., и др. Риск заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями в Уральской когорте аварийно-облучённого населения: 1956–2017 // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 6–17. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2020-13-3-6-17>.
- 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 Physics. 2019. Vol. 117, No 4. P. 378–387.
- Preston D.L. Epicure Users Guide. Seattle, Washington: Hirosoft International Corporation, 1993.
- Akaike H. A new look at the statistical model identification // In IEEE Transactions on Automatic Control. 1974. Vol. 19, No 6. P. 716–723. doi:10.1109/TAC.1974.1100705
- Preston D.L., Ron E., Tokuoka S., et al. Radiation Research. 2007 Jul. Vol. 168, No 1. P. 1–64. doi: 10.1667/RR0763.1. PMID: 17722996

Поступила: 01.07.2021 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

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

Шалагинов Сергей Александрович – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник эпидемиологической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России. Челябинск, Россия

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

Для цитирования: Крестинина Л.Ю., Микрюкова Л.Д., Шалагинов С.А., Силкин С.С., Епифанова С.Б., Аклеев А.В. Риск заболеваемости раком молочной железы у аварийно-облучённых лиц Южного Урала // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 3. С. 69-79. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-69-79

Breast cancer incidence risk in accidentally exposed persons of the Southern Urals

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

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

The objective of the paper is to assess the breast cancer incidence risk in the Ural cohort of accidentally exposed population. The cohort of people exposed in the Southern Urals on the Techa River and in the East Ural Radioactive Trace was created in 2018. This is the first time that breast cancer risk analysis in women in this cohort is being carried out. Over the period from 1956 to 2018, 337 breast cancer cases and 741,533 person-years at risk were reported in the female subcohort in the incidence catchment area. Mean accumulated dose to the mammary gland, calculated using the TRDS-2016 dosimetry system, was 46 mGy, the maximum dose was 1 Gy. Regression analysis was performed using the EPICURE software package. Statistical significance with 95% probability was assessed by the maximum likelihood method. As a result of the analysis, a statistically significant linear dependence of breast cancer parameters on the dose was obtained. Excess relative risk for the follow-up period from 1956 through 2018 for members of the female subcohort with a 5-year latency period was 2.39 / Gy. The paper also discusses the impact of available for analyses non-radiation factors on both baseline rates of breast cancer incidence and those associated with radiation exposure. These results do not contradict those obtained in the previous study in the Techa River Cohort separately, and in the Japanese LSS cohort of atomic bomb survivors.

Key words: breast cancer, Ural cohort of accidentally exposed population, radiogenic risk, excess relative risk.

References

- MacMahon B. Epidemiology and the causes of breast cancer. *International Journal of Cancer*. 2006;118(10): 2373–2378.
- Siegel R, Ma J, Zou Z, Jemal A. Cancer statistics, 2014 // *CA A Cancer Journal for Clinicians*. 2014;64(1): 9-29. <https://doi.org/10.3322/caac.21208>.
- DeSantis CE, Bray F, Ferlay J, Lortet-Tieulent J, Anderson BO, Jemal A. International Variation in Female Breast Cancer Incidence and Mortality Rates. *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*. 2015;24(10): 1495-506. <https://doi.org/10.1158/1055-9965>
- Chesnokova NP, Barsukov VJu, Zlobnova OA. Breast cancer: pathogenesis issues. *Fundamentalnye issledovaniya = Fundamental research*. 2012;4(1): 146-151. (In Russian).
- Cardis E, Vrijheid M, Blettner M, Gilbert E, Hakama M, Hill C, et al. Risk of cancer after low doses of ionising radiation: retrospective cohort study in 145 countries. *British Medical Journal*. 2005;331: 77–80.
- Land CE, Tokunaga M, Koyama K, Soda M, Preston DL, Nishimori I, et al. Incidence of female breast cancer among atomic bomb survivors, Hiroshima and Nagasaki, 1950–1990. *Radiation Research*. 2003;160(6): 707–717.
- Preston DL, Mattsson A, Holmberg E, Shore R, Hildreth NG, Boice JrJD. Radiation effects on breast cancer risk: a pooled analysis of eight cohorts. *Radiation Research*. 2002;158(2): 220–235.
- Recommendations of the ICRP. International Commission on Radiological Protection, Publication 103. 2007;37: 2-4.
- NAS/NRC, 2006. Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII Phase 2. Board on Radiation Effects Research. National Research Council of the National Academies, Washington, D.C.

Lyudmila Yu. Krestinina

Urals Research Center for Radiation Medicine

Address for correspondence: Vorovsky Str., 68-A, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: ludmila@urcrm.ru

10. Henderson BE, Ross RK, Pike MC, Casagrande JT. Endogenous hormones as a major factor in human cancer. *Cancer Research*. 1982;42(8): 3232-3239.
11. Imyanitov EN. Hereditary breast cancer. *Prakticheskaja onkologija = Practical oncology*. 2010;11(4): 258-265. (In Russian).
12. Lakhani SR, van de Vijver MJ, Jacquemier J, Anderson TJ, Osin PP, McGuffog L, et al. The pathology of familial breast cancer: predictive value of immunohistochemical markers estrogen receptor, progesterone receptor, HER-2, and p53 in patients with mutations in BRCA1 and BRCA2. *Journal of Clinical Oncology*. 2002;20(9): 2310-2318.
13. Ostroumova EV, Preston DL, Ron I, Krestinina LYu. Breast Cancer Incidence among Women Exposed to Chronic Ionising Radiation in the Techa Riverside Villages. *Medicinskaja radiologija i radiacionnaja bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2010;5(3): 37-47. (In Russian).
14. Krestinina LYu, Silkin SS, Mikryukova LD, Epifanova SB, Akleyev AV. Solid cancer incidence risk in in the Ural cohort of the accidentally exposed population: 1956–2017. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(3): 6-17. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2020-13-3-6-17>
15. Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, Shishkina EA, Shagina NB, Volchkova AYU, et al. Enhancements in the Techa River Dosimetry System: TRDS-2016D code for reconstruction of deterministic estimates of dose from environmental exposures. *Health Physics*. 2019;117(4): 378-387.
16. Preston DL. *Epicure Users Guide*. Seattle, Washington: Hirosoft International Corporation, 1993.
17. Akaike H. A new look at the statistical model identification. *In IEEE Transactions on Automatic Control*. 1974;19(6): 716-723. doi:10.1109/TAC.1974.1100705.
18. Preston DL, Ron E, Tokuoka S, Funamoto S, Nishi N, Soda M, et al. *Radiation Research*. 2007;168(1): 1-64. doi: 10.1667/RR0763.1. PMID: 17722996.

Received: July 01, 2021

For correspondence: Lyudmila Yu. Krestinina – Candidate of Medical Sciences, Head, Epidemiological Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia (Vorovsky Str., 68-A, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: ludmila@urcrm.ru)

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

Sergey A. Shalaginov – Candidate of Medical Sciences, Senior researcher of Epidemiological Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

Stanislav S. Silkin – 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, Honored 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., Mikryukova L.D., Shalaginov S.A., Silkin S.S., Epifanova S.B., Akleyev A.V. Breast cancer incidence risk in accidentally exposed persons of the Southern Urals. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No. 3. P. 69-79. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-69-79

Ретроспективный анализ онкологической заболеваемости пациентов после проведения компьютерной томографии

М.В. Осипов¹, В.Ю. Шкаредных², В.С. Логинов³, В.В. Мельников³,
П.С. Дружинина⁴, М.Э. Сокольников¹

¹ Южно-Уральский институт биофизики, Озёрск, Россия

² Областная клиническая больница № 3, Челябинск, Россия

³ Районная больница города Касли, Касли, Россия

⁴ Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

В статье проведён анализ онкологической заболеваемости пациентов в течение 10 лет после проведения диагностических исследований методом компьютерной томографии в зависимости от различных факторов. Для проведения исследования была собрана информация о жителях Озёрского городского округа, обследованных методом компьютерной томографии в Районной больнице г. Касли. Начало периода наблюдения 01.01.2009 г. соответствует вводу в эксплуатацию компьютерного томографа в отделении лучевой диагностики Каслинской районной больницы, окончание периода наблюдения соответствовало дате последнего уточненного жизненного статуса пациентов (31 декабря 2018 г.). Данные, полученные в исследовании, были сверены с данными ракового регистра и регистра умерших, а также с базой данных «Регистр КТ» для получения информации о жизненном статусе, заболеваемости злокачественными новообразованиями и КТ-исследованиях, проведённых вне Каслинской районной больницы. При оценке накопленной заболеваемости были учтены состояния, предшествующие онкологическим заболеваниям, диагнозы рака, выявленные до даты первого КТ-исследования, а также случаи рака, диагностированные при помощи КТ. В результате проведённого исследования получена информация о 275 обследованиях 246 жителей Озёрского городского округа. К концу периода наблюдения в исследуемой группе накоплено 46 диагнозов злокачественных новообразований. Среднее время наблюдения составило 6,5 года. Распределение канцерогенных эффектов среди пациентов, обследованных на КТ, представлено ретроспективно от даты рождения пациента до 31 декабря 2018 г. (даты окончания наблюдения). Проведено сравнение показателя накопленной заболеваемости злокачественными новообразованиями в исследуемой группе с результатами, полученными в когорте LSS, с поправкой на предрасполагающие состояния. Эпидемиологических данных о связи выявленных случаев злокачественных новообразований с действием диагностического излучения при проведении КТ не найдено. Данные, полученные в ходе исследования, предоставляют информацию об отдалённых онкологических эффектах после проведения компьютерной томографии, а также являются источником информации для комплексной оценки радиационного риска диагностического облучения в когорте.

Ключевые слова: радиационный риск, малые дозы облучения, рентгеновское излучение, компьютерная томография, заболеваемость, рак.

Введение

Радиационный канцерогенез в области малых доз представляет особый интерес для исследователей в связи со стохастической природой эффектов радиационного воздействия на организм человека [1]. Наибольшее внимание, с точки зрения радиационно-гигиенического нормирования, уделяется техногенной составляющей совокупного радиационного фона, которая наиболее значимо возросла за счет рентгенодиагностических исследований [2]. За последние десятилетия современные методы

лучевой диагностики, в том числе компьютерная томография (КТ), стали вносить значительный вклад в коллективную дозу населения Земли от источников техногенной радиации [3]. Это делает необходимой оценку радиогенного риска для обеспечения радиационной безопасности пациентов при проведении компьютерной томографии.

Несмотря на значительное количество опубликованных за последние десятилетия научных исследований по этому вопросу [4], оценка радиационного риска в области действия малых доз диагностического излучения в насто-

Осипов Михаил Викторович

Южно-Уральский институт биофизики

Адрес для переписки: 456780 Озёрск, Челябинская область, Озёрское шоссе 19-108; Email: Osipov@subi.su

ящее время является предметом дискуссий. Отсутствие специфических маркеров радиационного канцерогенеза, а также значительная вариабельность канцерогенных эффектов в зависимости от различных сопутствующих факторов радиационной и нерадиационной природы осложняют проблему оценки радиационного риска в области малых доз.

Согласно результатам эпидемиологического исследования, являющегося источником данных, используемых в современной радиационной защите (когорта LSS, Life Span Study), значимые результаты оценки радиационного риска были получены для лиц, дозы облучения которых превышали 100 мГр для внешнего облучения [5]. При этом в области высоких доз получены доказательства линейности тренда «доза – эффект». На основании этого для оценки радиационного риска в области малых доз было предложено использование экстраполяции значений радиационного риска из области высоких доз в соответствии с линейной беспороговой концепцией (ЛБК), предполагающей наличие радиационно-индуцированных эффектов при сколь угодно малой дозе облучения. Поскольку данная концепция не имеет прямого подтверждения фактическими данными в области малых доз, существует несколько альтернативных точек зрения, результатом которых стало появление надпороговой, линейной беспороговой, подпороговой моделей, а также модели радиационного гормезиса (рис. 1). Ввиду своей математической простоты линейная беспороговая модель получила наибольшее распространение.

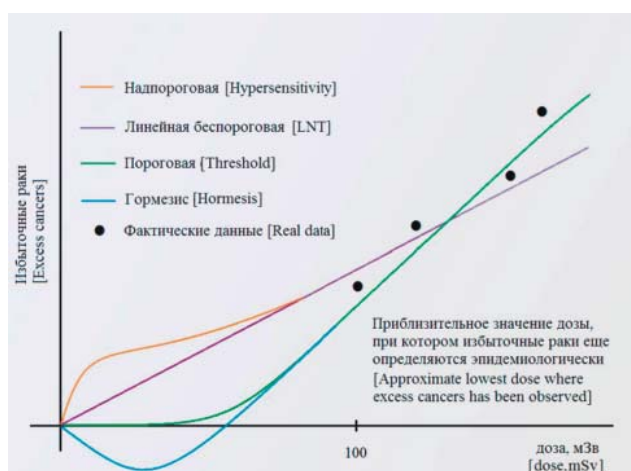


Рис. 1. Модели радиационного риска и эпидемиологические данные (по материалам Канадской комиссии по ядерной безопасности, 2015)¹

[Fig. 1. Radiation risk models and the epidemiological data (Adopted from Canadian nuclear safety commission, 2015)¹]

Экстраполяция значений риска на основании ЛБК успешно применяется в целях радиационно-гигиенического нормирования. В результате использования такого подхода были установлены допустимые уровни радиа-

ционного облучения для населения и профессионалов, подвергающихся производственному воздействию ионизирующего излучения. При этом особенности сценария медицинского диагностического облучения, для которого характерно неравномерное (локальное) воздействие, и связанные с ним особенности, включая возрастной состав и исходное состояние здоровья обследуемых, а также малые дозы [6], имеющие тенденцию к накоплению при повторных обследованиях [7], являются поводом для аргументированной критики применимости ЛБК в целях радиационной защиты пациентов [8].

Фактологической базой для обеспечения надежности радиационно-гигиенического нормирования в области малых доз является проведение эпидемиологических исследований с целью оценки риска развития отдалённых эффектов с учетом возможного влияния мешающих факторов радиационной и нерадиационной природы [9]. В случае, когда в роли радиационного фактора выступает диагностическое излучение, для которого характерны неоднократные эпизоды воздействия диагностического излучения в течение длительного периода, являющиеся типичными для обследований пациентов с хроническими заболеваниями, особого внимания требует учёт всей индивидуальной истории облучения пациента с целью недопущения переоценки совокупного радиационного риска, вызванного недооценкой дозы.

Цель исследования – оценка отдалённых онкологических эффектов в результате воздействия диагностического излучения на организм человека, во взаимосвязи с современными представлениями о радиационном риске в области малых доз. Настоящее исследование представляет дополнительный кластер данных для расширения базы данных «Регистр КТ» [10], используемой для проведения расширенного многоцентрового эпидемиологического исследования Озёрской когорты обследованных на КТ («ОККТ», «OCTC study»), которое предназначено для оценки радиогенного риска в результате проведения компьютерной томографии. Данные, полученные в исследовании, позволяют учесть дополнительные эпизоды облучения членов когорты ОККТ и минимизировать неопределенности в оценке радиационного риска вследствие недооценки совокупной дозы диагностического облучения пациента.

Материалы и методы

Источником информации для проведения исследования являлся архив отделения компьютерной томографии ГБУЗ «Районная больница г. Касли» (КРБ), расположенной на Южном Урале в 15 км от города Озёрск и производственного объединения «Маяк» (ПО «Маяк») – предприятия по производству компонентов ядерного оружия, изотопов, хранению, регенерации и утилизации ядерного топлива и радиоактивных отходов.

Эпидемиологическое исследование было проведено ретроспективно. В исследуемую группу вошли жите-

¹ Канадская комиссия по ядерной безопасности. Официальный сайт. URL: <https://nuclearsafety.gc.ca/eng/resources/health/linear-non-threshold-model/index.cfm> (Дата обращения: 09.08.2021) [Canadian nuclear safety commission. Official site. Available from: <https://nuclearsafety.gc.ca/eng/resources/health/linear-non-threshold-model/index.cfm> (Accessed: 09.08.2021)]

ли Озёрского городского округа (ОГО), обследованные в отделении лучевой диагностики КРБ на компьютерном томографе «Somatom Spirit» фирмы «Siemens Healthcare Diagnostics». Дата начала наблюдения соответствовала внедрению в начале 2009 г. нового метода рентгеновской диагностики – компьютерной томографии – в клиническую практику КРБ. Дата окончания наблюдения (31 декабря 2018 г.) соответствовала дате последнего уточнения информации о жизненном статусе населения ОГО. Критериями включения в исследуемую группу были:

- проживание в пределах Озёрского городского округа;
- прохождение КТ-исследования в КРБ.

Изучаемым фактором риска являлось воздействие рентгеновского диагностического излучения при проведении компьютерной томографии. Исследуемым эффектом являлось установление у пациента диагноза злокачественного новообразования в период после проведения КТ-исследования.

Для проведения исследования из архивных журналов КТ-исследований была собрана медико-дозиметрическая информация, включая пол пациента, возраст на момент исследования, исследованную область тела, использование контрастирования, количество сканирований, клинический диагноз и заключение рентгенолога после проведения КТ. Собранные из первичных источников данные были внесены в электронную базу данных (кластер КРБ).

Информация о жизненном статусе, причинах смерти и заболеваемости онкологическими заболеваниями населения ОГО была получена из популяционных регистров, созданных и поддерживаемых в Южно-Уральском институте биофизики. Данные о дате и диагнозе онкологического заболевания были получены из контрольных карт пациентов, внесённых в базу данных «Канцер-регистр» на дату 31 декабря 2019 г. Данные, полученные в ходе исследования, также были связаны с базой данных «Регистр КТ» для учета количества КТ-исследований, проведённых в других лечебных учреждениях Челябинской области. Источники информации о диагностических КТ-исследованиях населения ОГО вне КРБ описаны в исследовании [11].

Время под наблюдением для каждого пациента вычислялось от даты первого КТ-обследования до даты установления диагноза первого злокачественного новообразования (C00–C97), даты смерти или даты окончания наблюдения, в зависимости от того, что наступит раньше. Период наблюдения для лиц с онкологическими заболеваниями заканчивался датой диагноза первого ЗНО. Случаи вторых и последующих ЗНО исключались из анализа в связи с влиянием предшествующего рака как дополнительного фактора риска [12]. Наблюдения, в которых изучаемое событие (диагноз ЗНО) не наступило к моменту окончания периода наблюдения, цензурировались.

Расчёт эффективной дозы (ЭД) для каждого исследования выполнялся персоналом отделения КТ

согласно методическим указаниям МУ 2.6.1.3584-19 («Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении рентгенодиагностических исследований») с использованием значения $\text{dose-length product}$ (DLP, мГр*см) и значения коэффициентов $E_{(1)/DLP}$ (мЗв/мГр*см) для различных областей сканирования и возраста пациентов на момент проведения исследования. Суммарная величина ЭД определялась с учётом количества диагностических КТ, выполненных до даты установления диагноза ЗНО.

Случаи ЗНО, накопленные в исследуемой группе, разделялись на две категории в зависимости от даты первого обследования на КТ:

- 1) рак диагностирован до первого КТ;
- 2) рак диагностирован после первого КТ.

Показатель накопленной заболеваемости (CI_{10}) рассчитывался как количество случаев рака (n) в исследуемой группе, накопленное к концу периода наблюдения, по отношению к общему количеству наблюдаемых (N) на дату окончания периода наблюдения.

Лица с диагнозом ЗНО, установленным до даты 1-го КТ (n_0), считались неэкспонированными по отношению к изучаемому фактору (воздействию диагностического излучения при КТ). Предрасполагающие к установлению диагноза ЗНО состояния были определены как состояния, при которых клинический диагноз пациента при направлении или заключение врача КТ содержали информацию, относящуюся к опухолевому процессу. Случаи с предрасполагающими состояниями (n_1) также рассматривались как не связанные с воздействием КТ. В соответствии с этим показатель накопленной заболеваемости в исследуемой группе за 10-летний период наблюдения для новых случаев, экспонированных по отношению к изучаемому фактору (CI_{10}), рассчитывался согласно формуле 1:

$$CI_{10} = \frac{n - (n_0 + n_1)}{N - (n_0 + n_1)} \quad (1)$$

где n – общее количество первых раков, накопленных в исследуемой группе с момента рождения до конца наблюдения,

n_0 – случаи рака, подтвержденные во время или до 1-го КТ-исследования,

n_1 – случаи рака, подтвержденные после 1-го КТ-исследования с предрасполагающими состояниями, установленными до исследования,

N – общее количество пациентов в исследуемой группе.

Ожидаемое количество избыточных случаев (ИС) в каждой возрастной группе для пациентов КРБ вычислялось с использованием данных национальной статистики за 2009–2014 гг.² по формуле (2):

$$ИС\ ЗНО_{КРБ} = \frac{\lambda(РФ)}{100\ 000} * PYR(КРБ) \quad (2)$$

где $\lambda(РФ)$ – по возрастной показатель заболеваемости ЗНО всех локализаций в России на 100 000 человеко-лет, $PYR(КРБ)$ – количество человеко-лет, накопленных в когорте КРБ на момент окончания наблюдения.

² Злокачественные новообразования в России (заболеваемость и смертность) за 2009–2014 годы. Ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена. 2019, 250 с. [Malignant neoplasms in Russia in 2018 (morbidity and mortality). Eds. Kaprin, V.V. Starinsky, G.V. Petrova. Moscow. MNIOL after P.A. Herzen, branch of the Federal State Budgetary Institution «National Medical Research Center of Radiology», Ministry of Health of Russia, 2019. 250 p. (In Russ.)]

Статистический анализ данных был выполнен с использованием статистического программного обеспечения «Stata» [13]. Данные были обработаны с использованием общепринятых методов статистики, для средних величин указывалось стандартная ошибка среднего по формуле (3):

$$S.E. = \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (3)$$

где s – стандартное отклонение выборочного среднего,

N – объём выборки.

Для оценки полученных результатов использовался общепринятый уровень значимости 0,95. Значение вероятности (p), при котором отвергалась гипотеза об отсутствии значимого влияния исследуемого фактора, было принято на уровне 0,05.

Результаты и обсуждение

Из архивных протоколов было получено 275 записей исследований 246 жителей ОГО, проходивших КТ-диагностику в КРБ за период с 2009 по 2018 г. Исследуемая группа включала 113 мужчин (45,9%) и 133 (54,1%) женщины в возрасте на момент проведения 1-го КТ от 8 до 85 лет. Средний возраст пациентов составлял $52,5 \pm 1,0$ года. Количество лиц, обследованных в детском возрасте (до 18 лет), составило 6 человек (средний возраст $10,0 \pm 0,5$ лет).

11,8% пациентов исследуемой группы проходили повторные КТ-исследования (в среднем $3,5 \pm 0,6$ процедуры) в КРБ в течение всего периода наблюдения, длительность которого варьировала от 0 до 10 лет (в среднем $6,5 \pm 0,17$ лет). В 17,5% исследований использовалось болюсное внутривенное введение йодсодержащего контраста. Количество сканирований в исследованиях с контрастированием варьировало от 1 до 5. Количество и доля обследований в зависимости от анатомической области, а также среднее значение эффективной дозы (ЭД) и его

стандартная ошибка с учётом количества выполненных сканирований представлены в таблице 1.

Наибольшая доля исследований приходилась на область головного мозга (44,4%). Брюшная полость (включая поясничный отдел позвоночника) и грудная клетка были исследованы в 22,9% и 12,7% случаев соответственно. Доля остальных локализаций среди всех исследований составила менее 7%. Среднее значение ЭД в исследуемой группе за одно диагностическое КТ-исследование составило $1,96 \pm 0,12$ мЗв ($2,2 \pm 0,19$ мЗв для мужчин, и $1,8 \pm 0,16$ мЗв для женщин).

Оценка жизненного статуса и заболеваемости ЗНО

Информация о жизненном статусе получена по состоянию на 31 декабря 2018 г. К моменту окончания наблюдения умерло 36 пациентов (14,6%), из них в 19 случаях причиной смерти стало злокачественное новообразование. Количество пациентов, которые были живы и не имели диагноза ЗНО на дату окончания наблюдения, составило 77,1%.

Общее количество диагнозов заболевания ЗНО, накопленных в исследуемой группе, составило 46 (18,7%). В таблице 2 представлена структура заболеваемости ЗНО в исследуемой группе за период от даты рождения пациента до даты окончания наблюдения в зависимости от локализации рака.

Из 46 случаев ЗНО, накопленных в исследуемой группе ЗНО на дату окончания наблюдения, 30 случаев рака (65,2%) были диагностированы до 1-го КТ-исследования, проведенного в КРБ ($t \leq 0$), при этом 20 случаев рака были диагностированы в течение предшествующих 5 лет. Остальные 16 диагнозов ЗНО (34,8%) были установлены в течение 5 лет после первого КТ-исследования. Распределение случаев ЗНО, накопленных в исследуемой группе в течение периода наблюдения, в зависимости от даты первого КТ представлено в таблице 3.

Таблица 1
Распределение количества выполненных КТ в зависимости от области исследования и средняя доза за одно исследование

[Table 1]

Distribution of CT examinations by the area observed, and the average dose per one CT examination

Обследуемая область [Area examined]	Исследований [Examinations]	%	ЭД, мЗв (S.E.) [ED, mSv (S.E.)]
Голова [Head]*	122	44,4	0,8 (0,02)
Шея [Neck]	18	6,5	0,5 (0,04)
Грудная клетка [Thorax]*	35	12,7	2,3 (0,29)
Грудной отдел позвоночника [Thorax spine]	19	6,9	1,9 (0,16)
Брюшная полость и малый таз [Abdomen and pelvis]*	17	6,2	7,0 (0,53)
Поясничный отдел позвоночника [Lumbar spine]	46	16,7	3,6 (0,2)
Прочее** [Other]	18	6,5	0,97 (0,32)
Всего [Total]	275	100,0	–

* Включая исследования с контрастированием [including contrast enhancement];

**Включая суставы, конечности и смежные локализации [including joints, limbs and adjacent sites].

Структура онкологической заболеваемости в зависимости от локализации ЗНО

Таблица 2

[Table 2]

The structure of cancer incidence depending on cancer site]			
№	Локализация ЗНО [Cancer site]	n	Доля,% [Proportion,%]
1	Орофарингеальная зона [Oropharyngeal area]	1	2,2
2	ЖКТ [Gastrointestinal]	5	10,9
3	Органы дыхания [Respiratory]	9	19,6
4	Кожа, кости и соединительная ткань [Skin, bone and connective tissue]	6	13,0
5	Репродуктивная система, женщины [Reproductive system, female]	3	6,5
6	Репродуктивная система, мужчины [Reproductive system, male]	5	10,9
7	Выделительная система [Urinary system]	3	6,5
8	ЦНС [Central nervous system]	9	19,6
9	Другие и не точно обозначенные [Other and non-specified]	2	4,3
10	Лейкозы (Leukemia)	3	6,5
11	Всего [Total]	46	100,0

Период времени между датой первого КТ-исследования и диагнозом ЗНО

Таблица 3

[Table 3]

The time between the date of the first CT scan and cancer]		
Время, лет [time, years]	n	Доля,% [Proportion,%]
> 10 лет перед КТ [> 10 years before CT]	7	15,2
5–10 лет перед КТ [5 – 10 years before CT]	3	6,5
0–5 лет перед КТ [0 – 5 years before CT]	18	39,1
0–1 год после КТ [0 – 1 year before CT]	14	30,4
2–5 лет после КТ [2 – 5 years after CT]	4	8,7
Всего [Total]	46	100,0

Данные, приведённые в таблице 3, иллюстрируют особенности «госпитальной когорты», характеризующиеся наличием значительного количества лиц с предшествующим онкологическим анамнезом. При этом наибольшее количество диагнозов ЗНО, накопленных в данной группе, было установлено в течение последних 5 лет перед первым исследованием на КТ.

Предрасполагающие состояния

Согласно записям в протоколах обследований, в 8 случаях из 16 ЗНО, диагностированных после 1-го КТ, диагноз при направлении уже содержал упоминание о подозрении на злокачественное новообразование. Данные 8 случаев были исключены из анализа, так как воздействие диагностического излучения при проведении КТ не могло являться фактором риска появления онкологического процесса.

Исходя из этого, накопленная заболеваемость ЗНО в группе экспонированных (CI_{exp}), исключая случаи, не связанные с воздействием диагностического излучения при КТ, составила 3,8%. В таблице 4 приведены клинико-дозиметрические характеристики для этих случаев ЗНО, включая пол, возраст на момент исследования, суммарное количество выполненных в течение жизни КТ-

исследований (KT_{Σ}), суммарная эффективная доза за все КТ-исследования (ЭД), диагноз ЗНО согласно МКБ-10, стадия, на которой диагноз ЗНО был установлен, а также причина смерти и период наблюдения за пациентом (Т).

Среднее значение ЭД, накопленной с учетом предыдущих обследований вне КРБ, для указанных случаев ЗНО составило $6,7 \pm 6,0$ мЗв. Среди них было диагностировано 2 опухоли головного мозга (0,96%), 2 ЗНО предстательной железы (0,96%), по 1 случаю ЗНО поджелудочной железы, меланомы кожи, прямой кишки и ЗНО соединительной ткани (по 0,48%). Возраст онкологических пациентов на дату первого исследования на КТ варьировал от 54 до 77 лет, в среднем составляя $66,3 \pm 2,6$ года. Все злокачественные опухоли были диагностированы в течение первых 5 лет после первого КТ-обследования (в среднем через $1,4 \pm 0,5$ года). Из них 3 пациента умерли от рака в течение первого года после диагностики.

По данным национальной статистики за период с 2009 по 2014 г., соответствующий времени установления диагнозов рака в настоящем исследовании, было рассчитано ожидаемое количество случаев ЗНО всех локализаций среди мужчин и женщин по возрастным категориям. Полученные результаты представлены в таблице 5.

Таблица 4

Случаи ЗНО, возникшие после КТ-исследования в распределении по возрасту, полу, суммарному количеству КТ, накопленной эффективной дозе, диагнозу заболевания, причине смерти и времени наблюдения

[Table 4]

Cancer cases diagnosed after the 1st CT examination distributed by age, sex, maximum number of CT scans, accumulated effective dose, cancer diagnosis, cause of death and the duration of observation period]

№	Возраст [Age]	Пол [Sex]	КТ _Σ * [CT _Σ]	ЭД, мЗв [ED, mSv]	МКБ-10 [ICD-10]	Стадия ЗНО [Stage]	Т, дней [T, days]	Причина смерти [Death cause]
22	77	ж [f]	3*	2,5	C71.9	—**	87	C71.9
32	69	ж [f]	1	0,7	C70.0	—**	33	C70.1
127	54	ж [f]	5*	16,2	C25.0	3	145	Жив [Alive]
145	72	м [m]	1	5,7	C61.0	2	1014	Жив [Alive]
157	62	ж [f]	2*	15,1	C43.5	1	1282	Жив [Alive]
246	60	м [m]	1	5,0	C61.0	2	825	Жив [Alive]
255	67	м [m]	1	0,8	C20.0	—**	42	C20.0
268	69	ж [f]	1	7,4	C49.2	1	609	Жив [Alive]

*Включая КТ, проведённые вне КРБ [including CT outside KDH];

**Не определена [not defined].

Таблица 5

Результаты сравнения данных КРБ с данными национальной статистики

[Table 5]

Results of comparison of KDH data with the national statistics data]

Заболеваемость ЗНО в РФ [Russian Federation, all cancers by sex]			КРБ, человеко-лет [KDH, person-years]		Ожидаемое количество ЗНО [Expected cancers]	
Возрастной интервал [Age, years]	Мужчины [male]	Женщины [female]	Мужчины [male]	Женщины [female]	Мужчины [male]	Женщины [female]
0–4	17,1	15,6	–	–	0,00016	0,00026
5–9	11,9	9,3	1,4	2,8	0,00061	0,00090
10–14	10,5	9,3	5,8	9,7	0,00054	0,00038
15–19	14,5	14,0	3,7	2,7	0,00167	0,00246
20–24	17,3	22,4	9,7	11,0	0,00218	0,00265
25–29	24,4	45,2	8,9	5,9	0,00245	0,01893
30–34	38,5	82,8	6,4	22,8	0,02075	0,02979
35–39	62,9	138,4	32,9	21,5	0,03311	0,05559
40–44	112,9	214,8	29,3	25,9	0,05328	0,07326
45–49	216,7	317,1	24,6	23,1	0,14147	0,06663
50–54	432,3	452,7	32,7	14,7	0,23939	0,22339
55–59	785,9	612,1	30,5	36,5	0,30416	0,20780
60–64	1278,9	832,8	23,8	24,9	0,19104	0,16804
65–69	1696,5	966,7	11,3	17,4	0,12847	0,06278
70–74	2084,4	1102,7	6,2	5,7	0,05153	0,09038
75+	2264,2	1181,0	2,3	7,7	0,00016	0,00026
Все возрасты [All ages]	–	–	229,4	232,3	1,2	1,0

Согласно полученным данным, ожидаемое количество случаев ЗНО, с учётом возрастного-полового распределения и количества человеко-лет под наблюдением в изучаемой группе, составило 2,2 случая.

Таким образом, в течение 10-летнего периода наблюдения за 246 пациентами, подвергшимися воздействию

рентгеновского диагностического излучения в результате обследований методом компьютерной томографии в средней эффективной дозе 2,4 мЗв, было выявлено 16 новых случаев (6,5%) злокачественных новообразований различных локализаций. Из них 8 случаев ЗНО (3,8%), диагностированных в течение 5 лет после первого КТ,

не имели упоминания о предшествующих обследованию состояниях, связанных с наличием онкологического процесса. Приведённые данные могут свидетельствовать в пользу того, что указанные случаи ЗНО связаны с радиационным воздействием при диагностических КТ-исследованиях, при условии, что влияние конфаундинг-факторов не оказывало значимого влияния на развитие канцерогенных эффектов в изучаемой группе.

Подтверждением данного предположения служат результаты зарубежных исследований [15–18], согласно которым риск развития онкологических заболеваний после воздействия диагностического излучения при проведении КТ статистически значимо повышен. Так, при средней величине ЭД 4,5 мЗв при средней продолжительности наблюдения 9,5 лет риск развития онкологической патологии через 1 год и более после проведения КТ-исследования был на 24% выше, чем у лиц, не подвергавшихся воздействию диагностического КТ, с учетом возраста и пола [16]. По данным других исследований [17, 18], проведение диагностической КТ в возрасте до 21 года также статистически значимо связано с избыточным риском возникновения опухолей головного мозга, лейкемии и рака щитовидной железы.

Однако проводимая аналогия является в достаточной степени условной, поскольку не учитывает различное время под наблюдением для сравниваемых групп и не отражает особенностей, связанных с возрастом на момент облучения, различным состоянием здоровья обследованных, различных сценариев облучения при использовании разных КТ-сканеров и методик. Так, средняя продолжительность наблюдения в исследовании КРБ (6,5 лет) значительно меньше, чем в приводимых для сравнения публикациях (10 лет и более), а объём исследуемой когорты (680 211 пациентов в исследовании Mathews, 2013) многократно превышает объём выборки настоящего исследования.

При этом диагнозы рака щитовидной железы и лейкемии, выявленные в настоящем исследовании, были установлены до или во время проведения первого КТ-исследования. Для 2 случаев ЗНО ЦНС, выявленных после проведения КТ, время под наблюдением составило менее 100 дней, является недостаточным для установления причинной связи, исходя из длительности латентного периода, который, по данным [19], для солидных раков должна составлять в среднем 4,7 года. Это, в свою очередь, согласуется с результатами исследования [20], в котором доза облучения, полученная в результате компьютерной томографии и рентгенологических процедур, не увеличивала риск развития опухолей головного мозга у подростков.

В соответствии с рекомендациями [21] и методологией, применявшейся для расчета дозы с использованием 5-летнего лаг-периода для солидных раков [5], ни одна из злокачественных опухолей, диагностированных в исследуемой группе, не может быть отнесена на счет дозы облучения, полученной при КТ, поскольку период лаггирования дозы в 100% случаев будет превышать период под наблюдением, максимальное значение которого составило 3,5 года (см. табл. 4). Исходя из этого, избыточный риск возникновения рака в результате воздействия диагностического излучения при компьютерной томографии, с учётом необходимого латентного периода развития

ЗНО, на данном этапе исследования не может быть определён прямым методом.

Результаты расчёта, произведённые косвенным методом (см. табл. 5), показали, что ожидаемое количество избыточных случаев ЗНО в исследуемой группе составит 2,2 случая на группу из 246 человек. При этом фактическое наблюдаемое количество ЗНО, не связанных с предрасполагающими состояниями (8 случаев), свидетельствует о том, что исследуемая выборка имеет неслучайный характер, т.к. является «госпитальной», включающей, в основном, лиц с нарушениями здоровья, что приводит к ожидаемо более высокой вероятности установления диагноза рака, чем в целом по России. Однако данное различие может быть обусловлено и радиационным воздействием, не связанным с КТ-диагностикой, поскольку особенностью изучаемой группы является наличие профессионального облучения пациентов, являющихся работниками ПО «Маяк». Влияние производственного контакта с внешним гамма- и внутренним альфа-излучением является потенциальным конфаундинг-фактором, что может влиять на различие между фактическим количеством ЗНО у пациентов, и расчётным количеством избыточных случаев по данным национальной статистики.

Ограниченный период дожития для пожилых пациентов и пациентов с тяжелыми нарушениями здоровья затрудняет оценку канцерогенных эффектов воздействия диагностического излучения в смешанных возрастных группах с преобладанием лиц старшего возраста. Поскольку состояние здоровья, связанное с возрастом, может влиять на сокращение продолжительности жизни пациента [22], изменения, вызванные воздействием диагностического излучения, имеют меньшие шансы на реализацию в виде клинических проявлений злокачественного процесса. Тем не менее, наличие в исследуемой группе лиц, которые на дату окончания наблюдения были живы и которым не был установлен диагноз ЗНО (77,1%), представляет интерес для проведения дальнейшего исследования с расширенным периодом наблюдения для оценки реализации возможных отдалённых канцерогенных эффектов с латентным периодом более 5 лет.

Данные, собранные в настоящем исследовании, позволяют расширить существующую базу данных «Регистр КТ» [10], которая включает 26 626 КТ-исследований жителей Озёрского городского округа, обследованных методом компьютерной томографии в лечебных учреждениях Челябинской области за период более 25 лет. База данных предназначена для оценки радиогенного риска в области малых доз в когорте лиц, подвергавшихся воздействию излучения от различных источников, включая производственное облучение работников ПО «Маяк» [11]. Полученная в настоящем исследовании информация позволяет уточнить клинико-дозиметрические характеристики членов когорты, такие как причина направления на КТ-исследования и наличие предшествующих состояний, связанных с наличием онкологического процесса, а также сведения об оценке доз диагностического облучения.

Отсутствие надежных эпидемиологических данных для оценки радиационного риска в области малых доз диагностического излучения диктует необходимость соблюдения рекомендаций МКРЗ по снижению дозы облучения пациентов, что является особенно значимым при обследовании пациентов методом КТ [23], а также в слу-

чае наличия других факторов радиационного риска, таких как традиционное рентгенодиагностическое исследование и профессиональное облучение рабочих радиационно-опасных производств [24].

Заключение

Проведена ретроспективная количественная оценка канцерогенных эффектов в группе из 246 жителей Озёрского городского округа, подвергшихся воздействию малых доз диагностического излучения при проведении КТ. Средняя величина эффективной дозы, накопленной пациентами исследуемой группы составила 4,7 мЗв. Доля выявленных злокачественных новообразований среди данной группы пациентов в течение 5 лет после первого обследования методом КТ, с поправкой на наличие предрасполагающих состояний, составила 3,8%. Эпидемиологических данных о связи выявленных случаев рака с действием диагностического излучения при КТ-сканировании не обнаружено. Проведение дальнейшего исследования с расширенным периодом наблюдения целесообразно для оценки отдалённых эффектов среди 77,1% неонкологических пациентов, которые были живы на момент окончания наблюдения. Результаты, представленные в этой статье, предоставляют дополнительные данные для комплексной оценки радиационного риска в исследовании ОККТ.

Благодарности

Авторы выражают благодарность коллективам отделений компьютерной томографии ГБУЗ «Районная больница г. Касли» и ФГБУЗ «Челябинская областная клиническая больница № 3» за оказанную помощь в проведении исследования. Отдельную благодарность выражаем ведущему научному сотруднику лаборатории эпидемиологии Южно-Уральского института биофизики, профессору Нине Александровне Кошурниковой, а также старшему научному сотруднику лаборатории эпидемиологии Южно-Уральского института биофизики, к.б.н. Юлии Вячеславовне Царевой за помощь в оценке жизненного статуса и онкологической заболеваемости населения Озёрского городского округа.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Литература

1. National Research Council (US) Board on Radiation Effects Research. Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII, Phase I, Letter Report (1998). Washington (DC): National Academies Press (US); 1998. PMID: 25077203.
2. Medical Radiation Exposures. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly. 2008. 293 p.
3. Rühm W., Harrison R.M. High CT doses return to the agenda // Radiation and Environmental Biophysics. 2020. Vol. 59. P. 3-7. DOI: 10.1007/s00411-019-00827-9
4. Shultz C.H., Fairley R., Murphy L., Doss M. The risk of cancer from CT scans and other sources of low-dose radiation: a critical appraisal of methodologic quality // Prehospital and disaster medicine. 2020. Vol. 35, No. 1. P. 3-16. doi: 10.1017/S1049023X1900520X.
5. Preston D.L., Ron E., Tokuoka S., et al. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958–1998 // Radiation Research. 2007. Vol. 168. P. 1-64.
6. Brenner D.J., Hall E.J. Computed tomography-an increasing source of radiation exposure // The New England Journal of Medicine. 2007. Vol. 357. P. 2277-2284.
7. Rehani M.M., Melick E.R., Alvi R.M., et al. Patients undergoing recurrent CT exams: assessment of patients with non-malignant diseases, reasons for imaging and imaging appropriateness // European Journal of Radiology. 2020. Vol. 4. P. 1839-1846. doi: 10.1007/s00330-019-06551-8.
8. Suárez Fernández J.P. The downfall of the linear non-threshold model // Revista Española de Medicina Nuclear e Imagen Molecular. 2020. Vol. 39, No. 5. P. 303-315. DOI:10.1016/j.rem.2020.05.006.
9. ICRP (International Commission on Radiological Protection). Risk estimation for multifactorial diseases. A report of the International Commission on Radiological Protection. Ann ICRP 29; 1999. 1-144.
10. Осипов М.В., Сокольников М.Э., Фомин Е.П. База данных компьютерной томографии населения г. Озёрск («Регистр КТ»). Свидетельство о государственной регистрации № 2020622807 от 24.12.2020 г.
11. Осипов М.В., Фомин Е.П., Сокольников М.Э. Оценка влияния диагностического облучения с использованием радиационно-эпидемиологического регистра населения г. Озёрска, обследованного при помощи компьютерной томографии // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020. Т. 65, № 4. С. 65-73. DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-4-65-73.
12. Osipov M., Sokolnikov M. Previous Malignancy as a Risk Factor for the Second Solid Cancer in a Cohort of Nuclear Workers // SciMedicine Journal. 2021. Vol. 3, No. 1. P. 8-15. doi: https://doi.org/10.28991/SciMedJ-2021-0301-2.
13. Stata. Stata statistical software: Release 7.0. Stata Corporation, College Station, 2001.
14. Gómez A.M.L., Santana P.C., Mour o A.P. Dosimetry Study in Head and Neck of Anthropomorphic Phantoms in Computed Tomography Scans // SciMedicine Journal. 2020. Vol. 2, No. 1. P. 38-43.
15. Berrington de Gonzalez A., Mahesh M., Kim K-P., et al. Projected cancer risks from computed tomographic scans performed in the United States in 2007 // Archives of Internal Medicine. 2009. Vol. 169, No. 22. P. 2071–2077.
16. Mathews J.D., Forsythe A.V., Brady Z., et al. Cancer risk in 680,000 people exposed to computed tomography scans in childhood or adolescence: data linkage study of 11 million Australians // British Medical Journal. 2013. May 21. No 346. P. f2360. doi: 10.1136/bmj.f2360.
17. Li I.G., Yang Y.H., Li Y.T., et al. Paediatric computed tomography and subsequent risk of leukaemia, intracranial malignancy and lymphoma: a nationwide population-based cohort study // Scientific Reports. 2020. Vol. 10, No 1. P. 7759. doi: 10.1038/s41598-020-64805-8.
18. Shao Yu-H., Tsai K., Kim S., et al. Exposure to Tomographic Scans and Cancer Risks // JNCI Cancer Spectrum. 2020. Vol. 4, No.1. P.pkz072.
19. Горский А.И., Кашеев В.В., Туманов К.А. Латентный период индукции радиогенных солидных раков в когорте ликвидаторов // Радиация и риск. 2008. Т. 17, № 2. С. 30-38.
20. Kojimahara N., Yoshitake T., Ono K., et al. Computed tomography of the head and the risk of brain tumours during childhood and adolescence: results from a case-control study in Japan // Journal of Radiological Protection. 2020. doi: 10.1088/1361-6498/abacff. Epub ahead of print. PMID: 32759481.

21. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR 2012 report to the General Assembly. Scientific Annexes. New York. United Nations. 2015. 309 p.
22. Гаврилов Л.А., Гаврилова Н.С. Биология продолжительности жизни. М.: Наука, 1991. 280 с.
23. Osipov M.V., Lebedev N.I., Fomin E.P. Radiation Safety of Patients: Reducing the Radiation Dose in Abdominal Multislice Computed Tomography // Russian Electronic Journal of Radiology. 2015. Vol. 5, No.2, P. 47-51.
24. Осипов М.В., Сокольников М.Э. Проблемы оценки канцерогенного риска медицинского облучения в когорте персонала предприятия ядерно-промышленного комплекса // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2015. Т. 60, № 6. С. 60-66.

Поступила: 23.07.2021 г.

Осипов Михаил Викторович – врач, соискатель учёной степени кандидата медицинских наук, научный сотрудник лаборатории радиационной эпидемиологии Южно-Уральского института биофизики. **Адрес для переписки:** 456780 Озёрск, Челябинская область, Озёрское шоссе 19-108; Email: Osipov@subi.su

Шкаредных Виктор Юрьевич – врач, кандидат медицинских наук, главный специалист по лучевой диагностике Челябинской области, заведующий отделением лучевой диагностики Областной клинической больницы № 3 города Челябинска, Челябинск, Россия

Логинов Владислав Сергеевич – врач, заместитель главного врача по лечебной работе Районной больницы города Касли, Челябинская область, Касли, Россия

Мельников Владимир Викторович – кандидат медицинских наук, доцент, главный врач Районной больницы города Касли, Челябинская область, Касли, Россия

Дружинина Полина Сергеевна – соискатель учёной степени кандидата медицинских наук, младший научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Сокольников Михаил Эдуардович – научный руководитель, доктор медицинских наук, заведующий отделом радиационной эпидемиологии Южно-Уральского института биофизики, Озёрск, Россия

Для цитирования: Осипов М.В., Шкаредных В.Ю., Логинов В.С., Мельников В.В., Дружинина П.С., Сокольников М.Э. Ретроспективный анализ онкологической заболеваемости пациентов после проведения компьютерной томографии // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 3. С. 80-90. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-80-90

Retrospective analysis of cancer morbidity among patients after computed tomography

Mikhail V. Osipov¹, Viktor Yu. Shkarednykh², Vladislav S. Loginov³, Vladimir V. Melnikov³, Polina S. Druzhinina⁴, Mikhail E. Sokolnikov¹

¹ South Ural Institute of Biophysics, Ozersk, Russia

² Regional Clinical Hospital No. 3, Chelyabinsk, Russia

³ Kasli District Hospital, Kasli, Russia

⁴ 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

Cancer morbidity among patients examined using computed tomography within 10 years follow-up period depending on various factors has been retrospectively analyzed. Information on Ozyorsk residents examined at the Kasli District Hospital was retrospectively collected. The data collection period started in 2009 when the first computed tomography examination has been performed in the X-ray department of Kasli District Hospital, and ended by December 31, 2018. The data obtained in the study were linked to the local Cancer registry, the Death registry, and the "CT Registry" database to receive information about the vital status, can-

Mikhail V. Osipov

South Ural Institute of Biophysics

Address for correspondence: Ozyorskoe shosse 19-108, Ozyorsk, 456780, Chelyabinsk region, Russia; E-mail: Osipov@subi.su

cer morbidity and CT examinations performed outside the Kasli District Hospital. Cumulative incidence has been accounted in terms of predisposed conditions associated with cancer, cancer diagnoses stated before the date of the first CT examination and CT-confirmed malignancy cases. As a result of the study, information on 275 examinations of 246 residents of the Ozyorsk urban district has been derived. By the end of the observation period, 46 cases of malignant tumors were accumulated in the study group. The average time from 1st CT to the end of follow-up was 6.5 years. The distribution of carcinogenic effects among patients examined using CT has been shown retrospectively from the date of birth to the date of the end of follow-up. The cumulative cancer incidence adjusted for predisposing conditions has been compared with the LSS data. No epidemiological data were found on the relationship between the detected cases of malignant tumors and the diagnostic radiation from CT scans. The data obtained in the study provide information on the long-term oncological effects among Ozyorsk residents examined using CT as a source of additional information for a comprehensive assessment of the low dose effects associated with diagnostic exposure in the Ozyorsk Computed Tomography Cohort study.

Key words: radiation risk, low doses, X-ray, computed tomography, morbidity, cancer.

References

1. National Research Council (US) Board on Radiation Effects Research. Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII, Phase I, Letter Report (1998). Washington (DC): National Academies Press (US); 1998. PMID: 25077203.
2. Medical Radiation Exposures. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly. 2008; 293 p.
3. Rühm W, Harrison RM. High CT doses return to the agenda. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2020;59: 3-7. DOI: 10.1007/s00411-019-00827-9
4. Shultz CH, Fairley R, Murphy L, Doss M. The risk of cancer from CT scans and other sources of low-dose radiation: a critical appraisal of methodologic quality. *Prehospital and disaster medicine*. 2020;35(1): 3-16. doi: 10.1017/S1049023X1900520X.
5. Preston DL, Ron E, Tokuoka S, et al. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958–1998. *Radiation Research*. 2007;168: 1-64.
6. Brenner DJ, Hall EJ. Computed tomography-an increasing source of radiation exposure. *The New England Journal of Medicine*. 2007;357: 2277–2284.
7. Rehani MM, Melick ER, Alvi RM, et al. Patients undergoing recurrent CT exams: assessment of patients with non-malignant diseases, reasons for imaging and imaging appropriateness. *European Journal of Radiology*. 2020; 4: 1839-1846. doi: 10.1007/s00330-019-06551-8.
8. Suárez Fernández JP. The downfall of the linear non-threshold model. *Revista Española de Medicina Nuclear e Imagen Molecular*. 2020;39(5): 303-315. DOI:10.1016/j.remna.2020.05.006.
9. ICRP (International Commission on Radiological Protection). 1999. Risk estimation for multifactorial diseases. A report of the International Commission on Radiological Protection. Ann ICRP 29: 1-144.
10. Osipov MV, Sokolnikov ME, Fomin EP Database of computed tomography in Ozyorsk population ("CT Registry"). Registration Certificate No. 2020622807 from 24.12.2020. (In Russian).
11. Osipov MV, Fomin EP, Sokolnikov ME. Assessment of diagnostic exposure effect using the radiation-epidemiological registry of Ozyorsk population examined by computed tomography. *Medical radiology and radiation safety*. 2020;65(4): 65-73. DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-4-65-73. (In Russian).
12. Osipov M, Sokolnikov M. Previous Malignancy as a Risk Factor for the Second Solid Cancer in a Cohort of Nuclear Workers. *SciMedicine Journal*. 2021;3(1): 8-15. doi: https://doi.org/10.28991/SciMedJ-2021-0301-2.
13. Stata. Stata statistical software: Release 7.0. Stata Corporation, College Station, 2001.
14. Gómez AML, Santana PC, Mourão AP. Dosimetry Study in Head and Neck of Anthropomorphic Phantoms in Computed Tomography Scans. *SciMedicine Journal*. 2020;2(1): 38-43.
15. Berrington de González A, Mahesh M, Kim K-P, et al. Projected cancer risks from computed tomographic scans performed in the United States in 2007. *Archives of Internal Medicine*. 2009;169(22): 2071–2077.
16. Mathews JD, Forsythe AV, Brady Z, et al. Cancer risk in 680,000 people exposed to computed tomography scans in childhood or adolescence: data linkage study of 11 million Australians. *British Medical Journal*. 2013;346: f2360. doi: 10.1136/bmj.f2360.
17. Li IG, Yang YH, Li YT, et al. Paediatric computed tomography and subsequent risk of leukaemia, intracranial malignancy and lymphoma: a nationwide population-based cohort study. *Scientific Reports*. 2020;10(1): 7759. doi: 10.1038/s41598-020-64805-8.
18. Shao Yu-H, Tsai K, Kim S, et al. Exposure to Tomographic Scans and Cancer Risks. *JNCI Cancer Spectrum*. 2020;4(1): pkz072.
19. Gorsky AI, Kascheev VV, Tumanov KA. Latent period of induction of radiogenic solid cancers in a cohort of liquidators. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2008;17(2): 30-38. (In Russian).
20. Kojimahara N, Yoshitake T, Ono K, et al. Computed tomography of the head and the risk of brain tumours during childhood and adolescence: results from a case-control study in Japan. *Journal of Radiological Protection*. 2020; Epub ahead of print. doi: 10.1088/1361-6498/abacff. PMID: 32759481.
21. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR 2012 report to the General Assembly. Scientific Annexes. New York. United Nations; 2015. 309 p.
22. Gavrillo LA. Biology of life expectancy. Moscow: Nauka; 1991. 280 p. (In Russian).
23. Osipov MV, Lebedev NI, Fomin EP. Radiation Safety of Patients: Reducing the Radiation Dose in Abdominal Multislice Computed Tomography. *Russian Electronic Journal of Radiology*. 2015;5(2): 47-51.
24. Osipov MV, Sokolnikov ME. Problems of assessment of carcinogenic risk of medical exposure in a cohort of nuclear personnel. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2015;60(6): 60-66. (In Russian).

Received: July 23, 2021

For correspondence: Mikhail V. Osipov – MD, researcher of the laboratory of radiation epidemiology of the South Ural Institute of Biophysics (Ozyorskoe shosse 19-108, Ozyorsk, 456780, Chelyabinsk region, Russia; E-mail: Osipov@subi.su)

Viktor Yu. Shkarednykh – PhD, chief of X-ray diagnostics of the Chelyabinsk region, head of the department of X-ray diagnostics of the Regional Clinical Hospital No. 3, Chelyabinsk, Russia

Vladislav S. Loginov – deputy chief physician of the Kasli District Hospital, Kasli, Chelyabinsk Region, Russia

Vladimir V. Melnikov – PhD in Medical Sciences, Associate Professor, Chief Physician of the Kasli District Hospital, Kasli, Chelyabinsk Region, Russia

Polina S. Druzhinina – junior researcher, Medical protection laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

Mikhail E. Sokolnikov – scientific supervisor, doctor of medical sciences, head of the department of radiation epidemiology of the South Ural Institute of Biophysics. Ozyorsk, Russia

For citation: Osipov M.V., Shkarednykh V.Yu., Loginov V.S., Melnikov V.V., Druzhinina P.S., Sokolnikov M.E. Retrospective analysis of cancer morbidity among patients after computed tomography. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No. 3. P. 80-90. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-80-90

Сравнение методов расчета эффективных доз облучения детей при проведении КТ-исследований органов грудной клетки

П.С. Дружинина¹, А.В. Поздняков², Ю.Н. Капырина², Д.О. Иванов², Ю.В. Петренко², В.Г. Пузырев²

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 Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

Компьютерная томография — метод лучевой диагностики, ассоциированный с относительно высокими дозами облучения пациентов. Компьютерная томография активно используется для диагностики в педиатрии, однако достоверные данные о дозах пациентов-детей на сегодняшний день в Российской Федерации отсутствуют. В статье представлены результаты сбора данных антропометрических характеристик групп пациентов-детей со средним возрастом 5 (2–6), 10 (7–11) и 15 (12–16) лет, а также результаты сравнительной оценки эффективных доз этих пациентов при проведении компьютерно-томографических исследований органов грудной клетки, в том числе доз, скорректированных по массе тела и эффективному диаметру пациентов. Данные для исследования были собраны на базе компьютерно-томографического отделения Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета. За период с января по декабрь 2020 г. были собраны данные о 79 компьютерно-томографических исследованиях органов грудной клетки без контраста, выполненных трем группам детей со средним возрастом: 5, 10 и 15 лет. При сравнении эффективных доз, рассчитанных по методическим указаниям 2.6.1.3584–19, и доз, скорректированных по массе тела и эффективному диаметру пациентов, в среднем дозы отличались на 7,1% (максимально 65%). Наиболее высокие отклонения наблюдались у пациентов с аномально большой или аномально малой массой тела. При сравнении эффективных доз, определенных по методическим указаниям 2.6.1.3584–19, и доз, рассчитанных с использованием программного обеспечения NCICT 3.0, дозы, рассчитанные с помощью NCICT 3.0, были выше доз, рассчитанных по методическим указаниям 2.6.1.3584–19, в среднем на 18% (максимально — 53%). Такие различия объясняются тем, что в методических указаниях 2.6.1.3584–19 коэффициенты перехода представлены для наиболее распространенных параметров протоколов сканирования, а в NCICT 3.0 при расчете учитывались индивидуальные параметры сканирования для каждого пациента, которые могут отличаться от представленных в методических указаниях 2.6.1.3584–19. При сравнении доз, скорректированных по массе тела и эффективному диаметру пациентов, и доз, рассчитанных с помощью NCICT 3.0, в среднем дозы, рассчитанные по NCICT 3.0, были выше на 32% (максимально — 70%). Такая разница может быть объяснена как выраженными особенностями антропометрических данных отдельных пациентов из общей выборки, так и использованием разных типов фантомов: стилизованный фантом (Golikov et al) и воксельный в NCICT 3.0.

Ключевые слова: компьютерная томография, пациенты-дети, эффективные дозы, антропометрические характеристики.

Введение

На сегодняшний день компьютерная томография (КТ) является одним из наиболее информативных методов лучевой диагностики, широко применяющимся для диагностики как взрослых пациентов, так и пациентов-детей. КТ ассоциирована со значительными индивидуальными дозами облучения пациентов [1]. Число КТ-исследований в Российской Федерации с каждым годом растет с пропорциональным увеличением коллек-

тивной дозы от данного вида исследований. Кроме того, в условиях пандемии новой коронавирусной инфекции (COVID-19) в связи с недостаточной чувствительностью и длительностью выполнения методов лабораторной диагностики компьютерная томография в Российской Федерации стала основным методом ранней, первичной диагностики COVID-19, в том числе в педиатрии, за счет возможности предположить диагноз вирусной пневмонии, вызванной COVID-19, быстро оценить объ-

Дружинина Полина 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: druzhininapauline@gmail.com

ем поражения легочной ткани, степень тяжести и стадию изменений^{1,2,3,4}.

При этом в Российской Федерации отсутствует достоверная информация по уровням облучения пациентов-детей. Так, при заполнении формы № 3-ДОЗ системы ЕСКИД⁵, являющейся единственным централизованным источником информации по дозам облучения пациентов, исследования, выполненные детям, отдельно не учитываются. Отечественные публикации, посвященные исследованиям доз облучения детей при проведении рентгенорадиологических исследований, в том числе и компьютерной томографии, практически отсутствуют.

В зарубежных странах особое внимание уделяется радиационной защите пациентов-детей при проведении КТ-исследований, включающей в себя сбор и анализ данных об уровнях облучения детей, оценку типичных доз пациентов-детей, установление и использование референтных диагностических уровней в качестве инструмента оптимизации [1–9, 20–24]. Данные меры обуславливаются тем, что дети являются наиболее чувствительной категорией населения к воздействию ионизирующего излучения [4].

Одной из особенностей оценки доз облучения у детей является широкий диапазон их антропометрических характеристик (рост, масса тела, телосложение и прочие производные показатели), что обуславливает вариативность доз облучения индивидуальных пациентов.

В зарубежной практике активно разрабатываются и внедряются в практику методы оценки доз пациентов-детей, учитывающие их антропометрические характеристики [2–4]. В отечественной же практике на данный момент существующая методика оценки эффективных доз детей предполагает использование коэффициентов перехода, учитывающих лишь возраст пациента⁶. Тем не менее, и в

Российской Федерации постепенно начинают разрабатываться подходы к оценке доз детей, которые бы учитывали их антропометрические характеристики [10].

Цель исследования – рассмотреть и сравнить существующие методы расчёта эффективных доз детей со средним возрастом 5, 10 и 15 лет при проведении КТ-исследований органов грудной клетки, в том числе эффективных доз, скорректированных с учетом антропометрических характеристик: массы тела и эффективного диаметра пациентов (далее – $E_{кор}$); массы тела и роста пациентов (далее – E_{NCICT}).

Для этого по результатам сбора данных в КТ-отделении была выполнена оценка влияния антропометрических характеристик детей на их дозовые характеристики и определены дозы облучения с использованием трех методов – с учетом возраста, массы тела пациента и его эффективного диаметра ($E_{кор}$); а также с использованием специализированного программного обеспечения NCICT 3.0 (E_{NCICT}).

Материалы и методы

Данные для исследования были собраны на базе КТ-отделения Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета.

За период с января по декабрь 2020 г. были собраны данные о 79 КТ-исследованиях органов грудной клетки (ОГК) без контраста, выполненных 3 группам детей со средним возрастом: 5, 10 и 15 лет. Данная выборка была отобрана случайным образом из общего массива детей, которым были выполнены КТ-исследования в данный период. Распределение выборки пациентов по возрасту представлено в таблице 1.

¹ Временные методические рекомендации профилактика, диагностика и лечение новой коронавирусной инфекции (COVID-19) Версия 7 (03.06.2020) Министерство здравоохранения Российской Федерации https://static0.rosminzdrav.ru/system/attachments/attach/000/050/584/original/03062020_%D0%9C%D0%9A%D0%9A%D0%9A%D0%9A_v7.pdf [Temporary guidelines for the prevention, diagnosis and treatment of a novel coronavirus infection (covid-19) Version 7 (06/03/2020) Ministry of Health of the Russian Federation https://static0.rosminzdrav.ru/system/attachments/attach/000/050/584/original/03062020_%D0%9C%D0%9A%D0%9A%D0%9A_v7.pdf (In Russ.)]

² Методические рекомендации, алгоритмы действия медицинских работников на различных этапах оказания помощи, чек-листы и типовые документы, разработанные на период наличия и угрозы дальнейшего распространения новой коронавирусной инфекции в Санкт-Петербурге. Версия 2.0 от 10.06.2020 https://spbmiac.ru/wp-content/uploads/2020/06/COVID-19_Ver.2.0_10.06.pdf [Methodical recommendations, algorithms for medical staff at various stages of the provision of healthcare, checklists and standard documents developed for the period of the presence and threat of further spread of a novel coronavirus infection in St-Petersburg. Version 2.0 from 10.06.2020 https://spbmiac.ru/wp-content/uploads/2020/06/COVID-19_Ver.2.0_10.06.pdf (In Russ.)]

³ Министерство здравоохранения Российской Федерации. Временные методические рекомендации профилактика, диагностика и лечение новой коронавирусной инфекции (COVID-19) Версия 6 (28.04.2020) [Ministry of Health of the Russian Federation. Temporary guidelines for the prevention, diagnosis and treatment of novel coronavirus infection (covid-19). Version 6 (04/28/2020) (In Russ.)]

⁴ Методические рекомендации, алгоритмы действия медицинских работников на различных этапах оказания помощи, чек-листы и типовые документы, разработанные на период наличия и угрозы дальнейшего распространения новой коронавирусной инфекции в Санкт-Петербурге. Версия 1.0 – (17.04.2020) [Methodical recommendations, algorithms for the medical staff at various stages of healthcare, checklists and standard documents developed for the period of the presence and threat of further spread of a novel coronavirus infection in St. Petersburg. Version 1.0 – (04/17/2020) (In Russ.)]

⁵ Заполнение форм федерального государственного статистического наблюдения № 3-ДОЗ. Методические рекомендации по обеспечению радиационной безопасности. Утверждены Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 16.02.2007 г. № 0100/1659-07-26. [Filling of the Federal state statistical surveillance form No. 3-DOZ. Methodical recommendations the provision of the radiation safety. Approved by the Federal Service for Surveillance on Human Well-being and Consumer Rights Protection on February 16, 2007, No. 0100 / 1659-07-26. (In Russ.)]

⁶ МУ 2.6.1.3584-19 Изменения в МУ 2.6.1.2944-11 Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований. Методические указания. Утв. главным государственным санитарным врачом РФ 30.10.2019. [MU 2.6.1.3584-19 Changes in MU 2.6.1.2944-11 Control of the effective doses of patients for the medical X-ray examinations. Methodical instructions (In Russ.)]

Распределение выборки пациентов по возрасту

Таблица 1

[Table 1]

Number of patients participating in the study

Диапазоны возрастов [Age range]	Номинальный возраст в группе [Nominal age in group]	Количество пациентов [Number of patients]
2–6	5	19
7–11	10	34
12–16	15	26

Параметры стандартных протоколов сканирования

Таблица 2

[Table 2]

Standard CT-scan protocol parameters

Протокол [Protocol]	Тип сканирования [Scan type]	Коллимация, мм [Collimation, mm]	Питч, отн.ед. [Pitch, rel.un.]	Время оборота трубки, с [Rotation time, s]	Время сканирования, с [Scan time, s]	Напряжение, кВ [Voltage, kV]	Экспозиция, мАс [Exposition, mAs]	CTDIvol, мГр [CTDIvol, mGy]	DLP, мГр·см [DLP, mGy·cm]
Chest Low Dose	Helical	64 0,625	1,49	0,4	3	120	64	4,7	200,2
Child Chest 20–30kg	Helical	64 0,625	1,575	0,4	1,6	100	84	3,6	86,3
Chest Standart	Helical	64 0,625	0,797	0,75	9,8	120	159	12,2	510,8
Child Chest 40–50kg	Helical	64 0,625	1,49	0,4	1,7	120	104	8	193,8
Child Chest 30–40kg	Helical	64 0,625	1	0,4	2,5	100	158	6,8	159,9

Все исследования были выполнены на компьютерном томографе модели Brilliance eCT System (Philips Medical Systems, USA). Параметры стандартных протоколов сканирования представлены в таблице 2.

Для каждого пациента были собраны следующие характеристики:

- возраст, лет;
- рост, см;
- масса тела, кг.

Для каждого КТ-исследования были собраны следующие параметры:

- произведение дозы на длину (DLP, мГр·см);
- объемный компьютерно-томографический индекс дозы (CTDIvol, мГр);
- длина сканирования, см.

Антропометрические характеристики пациентов собирались путем анализа медицинских карт пациентов. Параметры проведения КТ-исследований собирались в специально разработанные анкеты путем непосредственной регистрации с консоли компьютерного томографа, а также по результатам анализа цифровых изображений в формате DICOM с предварительной анонимизацией.

Для уточненной оценки скорректированных эффективных доз для каждого пациента были определены передне-задний и боковой размеры тела и рассчитан эффективный диаметр (d_{eff}).

Эффективный диаметр – расчетный диаметр тела пациента в определенной его области, перпендикулярный оси сканирования Z. Эффективный диаметр предполагает, что тело человека имеет круглое поперечное сечение [3].

Расчет эффективных диаметров пациентов проводился с использованием выражения 1:

$$d_{eff} = \sqrt{AP \times LAT}, \text{ см} \quad (1)$$

где AP – передне-задний размер тела пациента, см;

LAT – боковой размер тела пациента, см.

Измерение передне-заднего и бокового размеров тела происходило с помощью программного обеспечения рабочей станции КТ Philips. Размеры тела измерялись на срезе, соответствовавшем уровню середины грудины. Погрешность определения передне-заднего и бокового размеров тела не превышала 2 мм.

Расчет доз детских пациентов был выполнен с использованием 3 методов:

1. Расчет эффективных доз в соответствии с методическими рекомендациями МУ 2.6.1.3584-19 «Изменения в МУ 2.6.1.2944-11 Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований» с использованием коэффициентов перехода, учитывающих возраст пациентов [18]. Расчет доз был выполнен с использованием выражения 2:

$$E = \sum DLP \times Ke, \text{ мЗв} \quad (2)$$

где DLP – произведение дозы на длину сканирования, мГр·см;

Ke – дозовый коэффициент для анатомической области, мЗв/(мГр·см).

В МУ 2.6.1.3584-19 коэффициенты перехода от DLP к эффективной дозе рассчитаны для набора стандартных воксельных фантомов детей с использованием взвешенных тканевых коэффициентов из публикации МКРЗ 60 [17]. В данной методике не учитывается специфика модели компьютерного томографа.

2. Расчет скорректированных эффективных доз пациентов-детей с использованием коэффициентов перехода, учитывающих массу тела пациента в соответствии с методикой из Golikov et al. [10]. Расчет доз был выполнен с использованием выражения 3:

$$E_{\text{кор}} = \frac{11,4 \times (1 - \exp(-0,11 \times 7 \times \sqrt[3]{W}))}{W} \times DLP \times l \times 0,001, \text{ мЗв} \quad (3)$$

где W – масса тела пациента, кг;

DLP – произведение дозы на длину сканирования, мГр·см;

l – длина окружности тела пациента, см; $l = d_{\text{эф}} \times \pi$.

Коэффициенты, использованные в формуле, были рассчитаны на базе расчетных стилизованных моделей типа MIRD-5 [11–13].

3. Расчет скорректированных эффективных доз пациентов-детей по массе тела и росту с использованием специализированного программного обеспечения NCICT 3.0 [14–16].

Данное ПО позволяет рассчитывать поглощенные дозы в органах с учетом специфики модели томографа на основании параметров проведения исследований и эффективную дозу. Необходимо отметить, что данная эффективная доза не соответствует определению МКРЗ и представляет собой величину, которая зависит от пола, массы тела и роста пациента [15, 16].

Условия облучения пациентов в NCICT 3.0 также моделируются с помощью воксельных фантомов [14–16].

Для расчёта скорректированной индивидуальной эффективной дозы для каждого пациента подбирался фантом, соответствующий его полу и наиболее близкий к его антропометрическим данным, также учитывалась модель компьютерного томографа и такие параметры проведения исследования, как длина сканирования и объемный компьютерно-томографический индекс дозы (CTDIvol).

Статистическая обработка данных была выполнена с использованием программ Statistica 12 и Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Антропометрические характеристики пациентов представлены в таблице 3.

Разница между минимальным и максимальным значениями роста пациентов для всех возрастных групп составила примерно 1,3 раза.

Разница между минимальным и максимальным значениями массы тела пациентов в возрастных группах 5 и 10 лет достигала примерно 2,5 раз. Наибольший разброс массы тела наблюдается в возрастной группе 15 лет (до 4 раз).

Результаты распределения рассчитанных эффективных диаметров в исследуемых возрастных группах представлены на рисунке 1.

Разница между минимальным и максимальным значениями эффективных диаметров пациентов в каждой возрастной группе достигала до 1,5 раз.

Из данных, представленных в таблице 4, видно, что более 68% детей по массе тела и 23% по росту отличаются как в большую, так и в меньшую стороны от референтных значений на $\pm 10\%$ и больше. Наиболее существенные отклонения от референтных значений в каждой возрастной группе на $\pm 10\%$ и больше наблюдаются по массе тела. Процент детей, отличающихся по этому показателю в разных возрастных группах, составил: 5 лет – 73%, 10 лет – 73%, 15 лет – 57%. Примерно 1/4 детей в каждой

Таблица 3

Антропометрические характеристики пациентов. Описательная статистика представлена в формате среднее $\pm$ среднеквадратическое отклонение (минимум – максимум)

[Table 3]

Anthropometric characteristics of patients. Descriptive statistics are presented in the format: mean $\pm$ standard deviation, (minimum – maximum)]

Возрастная группа, лет [Age group]	Пол [Gender]	Масса тела, кг [Body mass, kg]	Рост, см [Height, cm]	ИМТ, кг/м ² [Body mass index, kg/m ²]
5	М [M]	17,3 $\pm$ 4,4 (11–26)	106,8 $\pm$ 11,4 (92–131)	15,04 $\pm$ 2,3 (12,2–20,7)
	Ж [F]	16,4 $\pm$ 5,1 (9–25)	106 $\pm$ 12,2 (84–122)	14,3 $\pm$ 2,0 (12,0–18,6)
10	М [M]	28,9 $\pm$ 8,8 (18–51,5)	129,4 $\pm$ 12,2 (104–152)	16,9 $\pm$ 3,2 (11,5–22,8)
	Ж [F]	26,5 $\pm$ 5,7 (17,5–38)	129,8 $\pm$ 7,6 (120–143)	15,6 $\pm$ 2,5 (11,7–19,5)
15	М [M]	51,5 $\pm$ 15,3 (22–87)	162,7 $\pm$ 17,3 (127–185)	19,2 $\pm$ 4,0 (13,6–27,7)
	Ж [F]	47,3 $\pm$ 6,9 (37–56)	161,1 $\pm$ 7,6 (148,5–171)	18,2 $\pm$ 2,4 (15,2–23,2)

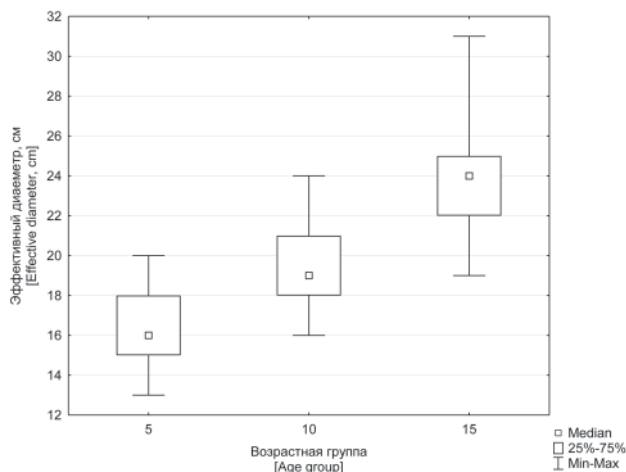


Рис. 1. Распределение рассчитанных эффективных диаметров в исследуемых возрастных группах. Результаты представлены в формате: медиана $\pm$ 25% — 75%-перцентили (минимум — максимум)

[Fig. 1. Distribution of calculated effective diameters in the studied age groups. Results are presented in the format: median $\pm$ 25% — 75%-percentiles (minimum — maximum)]

возрастной группе отличались по росту от референтных значений на $\pm 10\%$ и больше, также встречались дети, которые одновременно отличались и по росту, и по массе тела (16,5%).

Параметры распределения эффективных доз, E_{NCICT} и $E_{\text{кор}}$ за одну фазу исследования представлены в табли-

це 5. При сравнении доз, рассчитанных по МУ 2.6.1.3584-19 и $E_{\text{кор}}$ в среднем процентное отклонение составило около 7,1%. Отклонения наблюдались как в одну, так и в другую сторону, максимальное отклонение составило 65%.

При сравнении доз, определенных по МУ 2.6.1.3584-19 и с использованием программного обеспечения NCICT 3.0, дозы, рассчитанные с помощью NCICT 3.0, отличались от доз, рассчитанных по МУ 2.6.1.3584-19, и были выше в среднем на 18% (максимально — 53%).

При сравнении $E_{\text{кор}}$ и доз, рассчитанных с помощью NCICT 3.0, дозы по NCICT 3.0 были выше в среднем на 32% (максимально — 70%).

По результатам анализа полученных результатов были выявлены статистически достоверные ($p < 0,05$) различия между выборками доз: МУ 2.6.1.3584-19/ E_{NCICT} ; E_{NCICT} / $E_{\text{кор}}$. При сравнении выборок доз, рассчитанных по МУ 2.6.1.3584-19, и $E_{\text{кор}}$ достоверные различия отсутствовали.

Как следует из таблицы 4, большой процент детей от общей выборки ($>68\%$ по массе и 23% по росту) отличается от референтных значений [19] как в большую, так и в меньшую стороны, причем число детей, отличающихся по массе тела, гораздо больше, чем по росту. Такие существенные различия антропометрических характеристик могут быть обусловлены как отличием нашей группы от международной когорты МКРЗ [19] по расовому и национальному составу, так и особенностями индивидуального физического развития детей.

Как следует из таблицы 3, присутствуют значительные вариации по росту (до 1,3 раз) и массе тела (вплоть до 4

Таблица 4

Сравнение антропометрических данных исследуемых пациентов с референтными значениями, представленными в МУ 2.6.1.3584-19

[Table 4

Comparison of patient anthropometric data with the reference values presented in MU 2.6.1.3584-19]

Возраст [Age group]	Референтная масса тела, кг [Reference body mass values, kg]	Референтный рост, см [Reference height values, cm]	Общее количество детей [Total number of kids]	Количество детей, отличающихся от референтного значения массы тела ($\pm 10\%$) [The number of kids differing from the reference body mass values $\pm 10\%$]	Количество детей, отличающихся от референтного значения роста ($\pm 10\%$) [The number of kids differing from the reference height values $\pm 10\%$]	Количество детей, отличающихся от референтных значений массы тела и роста ($\pm 10\%$) [The number of kids differing from the reference body mass and height values $\pm 10\%$]
5 лет [5-year-old]	19	109	19	14	5	3
10 лет [10-year-old]	32	138	34	25	8	6
15 лет [15-year-old]	54,5	164	26	15	5	4
Всего [Total]			79	54	18	13

Таблица 5

Параметры распределения эффективных доз, E_{NCICT} и $E_{\text{кор}}$ за 1 фазу КТ- исследования органов грудной клетки педиатрических пациентов. Описательная статистика представлена в формате медиана $\pm$ среднеквадратическое отклонение (минимум — максимум)

[Table 5]

Distribution of parameters of effective doses, E_{NCICT} and E_{cor} per 1 phase of CT-examination. Descriptive statistics are presented in the format: median $\pm$ standard deviation (minimum — maximum)]

Возрастная группа [Age group]	E_{NCICT} мЗв [E_{NCICT} mSv]	МУ 2.6.1.3584-19, мЗв [MU 2.6.1.3584-19, mSv]	$E_{\text{кор}}$ (Golikov et al), мЗв [E_{cor} (Golikov et al), mSv]
5 лет [5-year-old]	2,8 $\pm$ 1,3 (0,8–5,6)	2,4 $\pm$ 1,3 (0,8–5,4)	2,3 $\pm$ 1,0 (0,8–4,6)
10 лет [10-year-old]	5,1 $\pm$ 1,2 (2,1–7,4)	4,6 $\pm$ 1,2 (1,3–6,8)	3,9 $\pm$ 1,0 (1,4–5,1)
15 лет [15-year-old]	6,3 $\pm$ 1,8 (1,7–10,4)	4,5 $\pm$ 1,6 (1,4–8,8)	4,5 $\pm$ 1,3 (1,6–6,8)

раз) в рамках выбранной возрастной категории. Данные вариации затрудняют применение действующих методик оценки скорректированных эффективных доз пациентов, отличающихся по своим параметрам от референтных (средних) значений, так как могут приводить как в недооценке, так и к переоценке доз. Использование эффективного диаметра в качестве дополнительной характеристики телосложения пациента для уточнения оценки скорректированных эффективных доз является более консервативным – вариации для индивидуальных пациентов в рамках одной возрастной категории не столь выражены (до 1,5 раз). К сожалению, определение эффективного диаметра в ручном режиме для каждого пациента (в соответствии с методикой, представленной в разделе «Материалы и Методы») занимает много времени. Однако данная методика на практике может быть использована для пациентов, существенно отличающихся по своим антропометрическим характеристикам.

При сравнении доз, определенных по МУ 2.6.1.3584-19 и с использованием программного обеспечения NCICT 3.0, дозы, рассчитанные с помощью NCICT 3.0, были выше доз, рассчитанных по МУ 2.6.1.3584-19 в среднем на 18% (максимально – 53%). Такие различия могут быть объяснены значительным отклонением массы тела и роста некоторых пациентов от референтных значений внутри исследуемых возрастных групп, для которых представлены коэффициенты перехода в МУ 2.6.1.3584-19. Кроме того, в МУ 2.6.1.3584-19 коэффициенты перехода представлены для наиболее распространенных параметров протоколов КТ-сканирования [18]. Поэтому в случае, если реальные параметры проведения КТ-сканирования для конкретного ребенка отличаются, возможно завышение или занижение значений E_{NCICT} . К сожалению, использование программы NCICT 3.0 в медицинской практике не может быть рекомендовано в связи с недостатком квалифицированных кадров (медицинских физиков).

Отклонения доз, рассчитанных по МУ 2.6.1.3584-19 и $E_{\text{кор}}$, могут объясняться значительным отклонением мас-

сы тела данных пациентов от референтных значений для каждой возрастной группы, для которых представлены коэффициенты перехода в МУ 2.6.1.3584-19, а также использование в расчетах коэффициентов для разных типов фантомов: стилизованный фантом [10] и воксельный в МУ 2.6.1.3584-19.

Различия в дозах при сравнении $E_{\text{кор}}$ и E_{NCICT} могут быть объяснены как выраженными особенностями антропометрических данных некоторых пациентов, так и использованием разных типов фантомов: стилизованный фантом [10] и воксельный в NCICT 3.0.

Отсутствие достоверных различий между выборками эффективных доз, рассчитанных по МУ 2.6.1.3584-19 и $E_{\text{кор}}$, свидетельствует о возможности использования МУ 2.6.1.3584-19 для расчета типичных эффективных доз для больших выборок пациентов. В случае значительного отклонения антропометрических данных пациента от референтных значений, представленных в МУ 2.6.1.3584-19, целесообразно использовать методику, представленную в статье [10].

Выводы

1. Результаты исследования показали, что внутри каждой возрастной группы детей существуют значительные вариации антропометрических характеристик: по весу до 4 раз, по росту и эффективному диаметру — до 1,5 раз.

2. Результаты оценки доз облучения детей (см. табл. 5) показали, что эффективные дозы у отдельных детей могут различаться до 2 раз.

3. По результатам анализа полученных результатов были выявлены достоверные ($p < 0,05$) различия между выборками доз: МУ 2.6.1.3584-19/ E_{NCICT} ; E_{NCICT} / $E_{\text{кор}}$. При сравнении выборок доз, рассчитанных по МУ 2.6.1.3584-19 и $E_{\text{кор}}$, достоверные различия отсутствовали.

4. МУ 2.6.1.3584-19 является наиболее простым и доступным методом расчёта эффективной дозы для детей. Однако в случае, если ребенок существенно отличается по своим антропометрическим характеристикам от рефе-

⁷ МУ 2.6.1.2944-11 Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований. Методические указания. Утв. главным государственным санитарным врачом РФ 19.07.2011. [MU 2.6.1.2944-11 Control of the effective doses of patients for the medical X-ray examinations. Methodical instructions (In Russ.)]

рентных значений, а также в случае отличия параметров проведения КТ-исследования от тех, для которых представлены коэффициенты перехода в МУ 2.6.1.3584-19, реальное значение эффективной дозы, полученное пациентом при проведении КТ-исследования, может быть переоценено или, наоборот, недооценено.

5. Для расчета $E_{кор}$ пациентов, существенно отличающихся по антропометрическим характеристикам от референтных значений, может быть использована методика, представленная в статье Golikov et al. [10]. В этом случае доза будет скорректирована по массе тела и эффективному диаметру пациента. Плюсом данного метода является то, что он учитывает особенности телосложения ребенка, однако есть и недостатки – трудности в определении эффективного диаметра пациента при отсутствии специализированного программного обеспечения, а также сложность расчетов для медицинского персонала в условиях постоянной загруженности КТ-отделений. Такой метод может быть внедрен в практику в случае его упрощения или автоматизации.

6. Расчет скорректированной эффективной дозы с помощью NCICT 3.0 позволяет учесть большое количество факторов, влияющих на дозу ребенка, таких как телосложение, пол, модель компьютерного томографа, а также параметры проведения КТ-исследования (напряжение, экспозиция, питч, коллимация, $CTDI_{vol}$, длина сканирования). Однако данный метод не имеет возможности широкого распространения в медицинской практике в связи с отсутствием квалифицированных кадров (медицинских физиков).

Благодарности

Авторы выражают благодарность медицинскому персоналу КТ-отделения Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета за содействие в проведении исследования, а также Ларисе Александровне Чипиге, Александру Валерьевичу Водоватову и Владиславу Юрьевичу Голикову (Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены им. П.В. Рамзаева, Санкт-Петербург, Российская Федерация) за помощь в обсуждении результатов.

Литература

1. Дружинина П.С., Чипига Л.А., Рыжов С.А., и др. Современные подходы к обеспечению качества диагностики в компьютерной томографии // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 1. С. 17-33.
2. Khawaja R.D.A., Singh S., Vettiyl B., et al. Simplifying Size-Specific Radiation Dose Estimates in Pediatric CT // American Journal of Roentgenology. 2015. Vol. 204. P. 167-177.
3. The American Association of Physicists in Medicine. Size-Specific Dose Estimates (SSDE) in Pediatric and Adult Body CT Examinations/ American Association of Physicists in Medicine // AAPM. 2011. Report No 204. 30 p.
4. The International Commission on Radiological Protection. Diagnostic Reference Levels in Medical Imaging // ICRP PUBLICATION 135. Ann. ICRP 2017. Vol. 46, No 1. P. 140.
5. Journy N.M.Y., Dreuil S., Boddart N., et al. Individual radiation exposure from computed tomography: a survey of paediatric practice in French university hospitals, 2010-2013 // European Radiology. 2018. Vol. 28, No 2. P. 630-641. Doi: 10.1007/s00330-017-5001-y.
6. Célier D., Roch P., Etard C., et al. Multicentre survey on patient dose in paediatric imaging and proposal for updated diagnostic reference levels for France. Part 1: computed tomography // European Radiology. 2020; Vol. 30, No. 2. P. 1156-1165. Doi: 10.1007/s00330-019-06405-3.
7. Vassileva J., Rehani M., Kostova-Lefterova D., et al. A study to establish international diagnostic reference levels for paediatric computed tomography // Radiation Protection Dosimetry. 2015. Vol. 165, No 1-4. P. 70-80. Doi: 10.1093/rpd/ncv116.
8. Strauss K.J., Somasundaram E., Sengupta D., et al. Radiation Dose for Pediatric CT: Comparison of Pediatric versus Adult Imaging Facilities // Radiology. 2019. Vol. 291, No. 1. P. 158-167. Doi: 10.1148/radiol.2019181753.
9. Jackson D., Bettenay F., Clark J., et al. Paediatric CT dose: a multicentre audit of subspecialty practice in Australia and New Zealand // European Radiology. 2015. Vol. 25, No. 11. P. 3109-22. Doi: 10.1007/s00330-015-3727-y.
10. Golikov V., Druzhinina P. Technical Note: Patient-weight dependence of the effective dose conversion coefficients for diagnostic X-ray imaging procedures // Medical Physics Journal. 2020. Vol. 47, No. 10. P. 5366-5372.
11. Snyder W.S., Ford M.R., Warner G.G., Watson G.G. Revision of MIRD Pamphlet No 5 Entitled 'Estimates of Absorbed Fractions for Monoenergetic Photon Sources Uniformly Distributed in Various Organs of a Heterogeneous Phantom. ORNL-4979 // Tennessee: Oak Ridge National Laboratory. 1974.
12. Cristy M. Mathematical Phantoms Representing Children of Various Ages for Use in Estimates of Internal Dose // Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, ORNL/NUREG/TM-367. 1980. 55 p.
13. Han E.Y., Bolch W.E., Eckerman K.F. Revisions to the ORNL series of adult and pediatric computational phantoms for use with the MIRD schema // Health Physics Journal. 2006. No. 90. P. 337-356.
14. Lee Ch., Kim K.P., Bolch W.E., et al. NCICT: a computational solution to estimate organ doses for pediatric and adult patients undergoing CT scans // Journal of Radiological Protection. 2015. Vol. 35, No. 4. P. 891-909. Doi: 10.1088/0952-4746/35/4/891
15. Lee Ch. NCICT: user manual. 2021. 6 p.
16. National Cancer Institute. URL: <https://ncidose.cancer.gov> (Дата обращения: 26.07.2021).
17. Международная Комиссия по Радиационной защите. Рекомендации Международной Комиссии по Радиологической защите 1990 года. Публикация 60 МКРЗ: пер. с англ./под ред. И.Б. Кеирим-Маркуса. М.: Энергоатомиздат, 1994. 207 с.
18. 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.
19. Международная комиссия по радиологической защите. Основные анатомические и физиологические данные для использования в радиационной безопасности. Публикация 89 МКРЗ: пер. с англ./под ред. И. Б. Кеирим-Маркуса. М.: Медкнига, 2007. 318 с.
20. Brady Z., Ramanauskas F., Cain T.M., Johnston P.N. Assessment of paediatric CT dose indicators for the purpose of optimization // The British Journal of Radiology. 2012. Vol. 85, No. 1019. P. 1488-98. Doi: 10.1259/bjr/28015185.
21. Matsunaga Yu., Kawaguchi A., Kobayashi M., et al. Effective radiation doses of CT examinations in Japan: a nationwide questionnaire-based study // The British Journal of Radiology. 2016. Vol. 89, No. 1058. P. 20150671. Doi: 10.1259/bjr.20150671
22. Gudjonsdottir J., Jonsdottir A.B. Effective dose from pediatric CT in Iceland // Laeknabladid. 2017. Vol. 103, No 11. P. 489-492. Doi: 10.17992/ibl.2017.11.160.
23. Pages J., Buis N., Osteaux M. CT doses in children: a multicentre study // The British Journal of Radiology.

2003. Vol. 76, No. 911. P. 803-11. Doi: 10.1259/bjr/92706933.
24. Mordacq C., Deschildre A., Petyt L., et al. Chest computed tomography in children: indications, efficiency and effective dose // Archives de Pédiatrie Journal. 2014. Vol. 21, No. 3. P. 279-86. Doi: 10.1016/j.arcped.2013.12.021.

Поступила: 12.05.2021 г.

Дружинина Полина Сергеевна – младший научный сотрудник, лаборатория радиационной гигиены медицинских организаций, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт 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: druzhininapauline@gmail.com

Поздняков Александр Владимирович – доктор медицинских наук, профессор, заведующий отделением лучевой диагностики, заведующий кафедрой медицинской биофизики, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

Капырина Юлия Николаевна – ассистент кафедры общей гигиены, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

Иванов Дмитрий Олегович – доктор медицинских наук, профессор, ректор Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета, Санкт-Петербург, Россия

Петренко Юрий Валентинович – кандидат медицинских наук, проректор по лечебной работе, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

Пузырев Виктор Геннадьевич – кандидат медицинских наук, доцент, заведующий кафедрой общей гигиены, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Дружинина П.С., Поздняков А.В., Капырина Ю.Н., Иванов Д.О., Петренко Ю.В., Пузырев В.Г. Сравнительная оценка эффективных доз облучения детей при проведении КТ-исследований органов грудной клетки // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 3. С. 91-100. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-91-100

Comparison of methods for calculating effective doses for children during CT examinations of the chest organs

Polina S. Druzhinina¹, Aleksandr V. Pozdnyakov², Yuliya N. Kapryrina², Dmitriy O. Ivanov², Yuriy V. Petrenko², Viktor G. Puzyrev²

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 Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

Computed tomography is associated with high patient doses. CT is actively used for pediatric, however, currently there is no reliable data on the pediatric patient doses in the Russian Federation. The current study presents the data on the anthropometric characteristics of 5, 10 and 15-year-old pediatric patients, as well as the results of a comparative assessment of the effective doses of these patients during CT-examinations of chest, considering their anthropometric data. The effective doses were calculated using three methods: based on the actual guidelines (MU 2.6.1.3584-19) using the age specific conversion coefficients; using the conversion coefficients considered patient body mass and effective diameter; using a specialized software NCICT 3.0. The difference between effective doses according to actual guidelines and considering patient body mass and effective diameter was about 7.1% (max-65%). High deviations were observed in patients with abnormally large or abnormally low body mass. Effective doses calculated using NCICT 3.0 were higher compared to doses calculated according to actual guidelines on average by 18% (max – 53%). Such differences are explained by the fact that in MU 2.6.1.3584-19 conversion coefficients are presented for the most common CT-scan parameters of protocols, and in NCICT 3.0 the calculation considers individual scan parameters for each patient. The difference between effective doses according to NCICT 3.0 and considering patient body

Polina S. Druzhinina

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

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

mass and effective diameter was about 32% (max-70%). This difference can be explained by the differences in the anthropometric data of some patients, and by the use of different types of phantoms: a stylized phantom (Golikov et al) and a voxel phantom in NCICT 3.0.

Key words: computed tomography, pediatric patients, effective doses, anthropometric characteristic.

References

1. Druzhinina PS, Chipiga LA, Ryzhov SA, Vodovotov AV, Berkovich GV, Smirnov AV, et al. Proposals for the Russian quality assurance program in computed tomography. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(1): 17-33. (In Russian).
2. Khawaja RDA, Lim R, Gee M, Westra S, Kalra MK. Simplifying Size-Specific Radiation Dose Estimates in Pediatric CT. *American Journal of Roentgenology*. 2015;204: 167-177.
3. The American Association of Physicists in Medicine. Size-Specific Dose Estimates (SSDE) in Pediatric and Adult Body CT Examinations. *American Association of Physicists in Medicine*. AAPM. Report No 204. 2011. 30 p.
4. The International Commission on Radiological Protection. Diagnostic Reference Levels in Medical Imaging. ICRP PUBLICATION 135. Ann. *ICRP*. 2017;46(1): 140.
5. Jourmy NMY, Dreuil S, Boddaert N, Chateil J-F, Defez D, Ducou-le-Pointe H, et al. Individual radiation exposure from computed tomography: a survey of paediatric practice in French university hospitals, 2010-2013. *European Radiology*. 2018;28(2): 630-641. Doi: 10.1007/s00330-017-5001-y.
6. Clier D, Roch P, Etard C, Ducou Le Pointe H, Brisse HJ. Multicentre survey on patient dose in paediatric imaging and proposal for updated diagnostic reference levels for France. Part 1: computed tomography. *European Radiology*. 2020;30(2): 1156-1165. Doi: 10.1007/s00330-019-06405-3.
7. Vassileva J, Rehani M, Kostova-Lefterova D, I-Naemi HMA, Al Suwaidi JS, Arandjic D, et al. A study to establish international diagnostic reference levels for paediatric computed tomography. *Radiation Protection Dosimetry*. 2015;165(1-4): 70-80. Doi: 10.1093/rpd/ncv116.
8. Strauss KJ, Somasundaram E, Sengupta D, Marin JR, Brady SL. Radiation Dose for Pediatric CT: Comparison of Pediatric versus Adult Imaging Facilities. *Radiology*. 2019;291(1): 158-167. Doi: 10.1148/radiol.2019181753.
9. Jackson D, Atkin K, Bettenay F, Clark J, Ditchfield MR, Grimm JE, et al. Paediatric CT dose: a multicentre audit of subspecialty practice in Australia and New Zealand. *European Radiology*. 2015;25(11): 3109-22. Doi: 10.1007/s00330-015-3727-y.
10. Golikov V, Druzhinina P. Technical Note: Patient-weight dependence of the effective dose conversion coefficients for diagnostic X-ray imaging procedures. *Medical Physics Journal*. 2020;47(10): 5366-5372.
11. Snyder WS, Ford MR, Warner GG, Watson GG. Revision of MIRD Pamphlet No 5 Entitled 'Estimates of Absorbed Fractions for Monoenergetic Photon Sources Uniformly Distributed in Various Organs of a Heterogeneous Phantom. ORNL-4979. Tennessee: Oak Ridge National Laboratory; 1974.
12. Cristy M. Mathematical Phantoms Representing Children of Various Ages for Use in Estimates of Internal Dose. Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, ORNL/NUREG/TM-367; 1980. 55 p.
13. Han EY, Bolch WE, Eckerman KF. Revisions to the ORNL series of adult and pediatric computational phantoms for use with the MIRD schema. *Health Physics Journal*. 2006;90: 337-356.
14. Lee Ch, Kim KP, Bolch WE, Moroz BE, Folio L. NCICT: a computational solution to estimate organ doses for pediatric and adult patients undergoing CT scans. *Journal of Radiological Protection*. 2015;35(4): 891-909. Doi: 10.1088/0952-4746/35/4/891
15. Lee Ch. NCICT: user manual. 2021. 6 p.
16. National Cancer Institute. – Available from: <https://ncidose.cancer.gov> (accessed: 26.07.2021).
17. International Commission on Radiation Protection. International 1990 Radiological Protection Commission. Publication 60 ICRP: trans. from English / ed. I.B. Keirim-Marcus. Moscow: Energoatomizdat, 1994. 207 p. (In Russian)
18. Golikov VYu, Chipiga LA, Vodovotov 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) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-3-120-132>
19. International Commission on Radiological Protection. Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference Values. ICRP Publication 89. 2002;32(3-4): 282. (In Russian)
20. Brady Z, Ramanauskas F, Cain TM, Johnston PN. Assessment of paediatric CT dose indicators for the purpose of optimization. *The British Journal of Radiology*. 2012;85(1019): 1488-98. Doi: 10.1259/bjr/28015185.
21. Matsunaga Yu, Kobayashi K, Kobayashi M, Asada Ya, Minami K, Suzuki Sh., et al. Effective radiation doses of CT examinations in Japan: a nationwide questionnaire-based study. *The British Journal of Radiology*. 2016;89(1058): 20150671 Doi: 10.1259/bjr.20150671
22. Gudjonsdottir J., Jonsdottir A.B. Effective dose from pediatric CT in Iceland. *Laeknabladid*. 2017;103(11): 489-492. Doi: 10.17992/ibl.2017.11.160.
23. Pages J, Buls N, Osteaux M. CT doses in children: a multicentre study. *The British Journal of Radiology*. 2003;76(911): 803-11. Doi: 10.1259/bjr/92706933.
24. Mordacq C, Deschildre A, Petyt L, Santangelo T, Delvart C, Doan , et al. Chest computed tomography in children: indications, efficiency and effective dose. *Archives de Pédiatrie Journal*. 2014;21(3): 279-86. Doi: 10.1016/j.arcped.2013.12.021.

Received: May 12, 2021

For correspondence: Polina S. Druzhinina – junior researcher, Medical protection laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: druzhininapauline@gmail.com)

Aleksandr V. Pozdnyakov – Ph.D., Professor, the Head of the Department of Radiation Diagnostics, the Head of the Department of Medical Biophysics, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint -Petersburg, Russia

Yuliya N. Kapyrina– the Assistant of the Department of General Hygiene, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint -Petersburg, Russia

Dmitry O. Ivanov – MD, Ph.D., Professor, Rector of Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint -Petersburg, Russia

Yuriy V. Petrenko – MD, Ph.D., Vice-rector for Medical Work, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint -Petersburg, Russia

Viktor G. Puzyrev – MD, Ph.D., Assistant Professor, the Head of the Department of General Hygiene, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint -Petersburg, Russia

For citation: Druzhinina P.S., Pozdnyakov A.V., Kapyrina Yu.N., Ivanov D.O., Petrenko Yu.V., Puzyrev V.G. Comparison of methods for calculating effective doses for children during CT examinations of the chest organs. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No. 3. P. 91-100. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-91-100

О необходимости проведения регулярного контроля доз облучения хрусталиков глаз у персонала, занятого на работах с использованием радиофармацевтических препаратов

Е.Н. Шлеенкова¹, С.Ю. Бажин¹, Г.Н. Кайдановский¹, Л.А. Чипига^{1,2,3}, В.А. Ильин¹

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 Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова Минздрава России, Санкт-Петербург, Россия

³ Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова Минздрава России, Санкт-Петербург, Россия

Международная комиссия по радиационной защите в 2011 г. определила пороговое значение поглощенной дозы для образования катаракты хрусталика глаза равным 0,5 Гр как для острого, так и для хронического облучения. Был установлен предел дозы облучения хрусталика глаза, равный 20 мЗв в год, усредненный за 5 последовательных лет (100 мЗв за 5 лет), и 50 мЗв за любой отдельный год. В российских нормативных документах указан дозовый предел облучения хрусталика глаза, равный 150 мЗв в год, и отсутствуют четкие критерии, определяющие условия, при которых необходимо проведение индивидуального дозиметрического контроля облучения хрусталика глаза, но следует ожидать, что в ближайшие годы в России также будет снижен дозовый предел. Цели исследования: оценка доз облучения хрусталиков глаз персонала медицинских организаций, проводящих работы с радиофармацевтическими препаратами; выявление связи дозы облучения хрусталика глаза с типом и величиной активности радионуклида, которым мечен радиофармацевтический препарат; обоснование целесообразности и выявление категорий персонала для проведения регулярного индивидуального дозиметрического контроля дозы облучения хрусталика глаза в медицинских организациях, проводящих работы с радиофармацевтическими препаратами. В рамках исследования были проведены измерения доз облучения хрусталиков глаз работников подразделений ядерной медицины двух медицинских организаций города Санкт-Петербурга, осуществляющих обращение с радиофармацевтическими препаратами, проанализирована возможность выявления высоких доз облучения хрусталиков глаз у этого персонала. Длительность контроля составила 1 месяц. Персонал был поделён на две группы в зависимости от типа радионуклидов в радиофармацевтических препаратах, с которыми проводились работы: 1) персонал отделений ПЭТ и блока радионуклидного обеспечения, в которых проводят работы с радиофармацевтическими препаратами, мечеными позитрон-излучающими радионуклидами (¹¹C, ¹⁸F, ⁶⁸Ga); 2) персонал отделений радионуклидной диагностики и терапии, в которых проводят работы с радиофармацевтическими препаратами, мечеными радионуклидами ⁸⁹Sr, ^{99m}Tc. Измерения операционной величины Hp(3) проводились методом термoluminesцентной дозиметрии. Использовались индивидуальные дозиметры, соответствующие условиям определения операционной величины. Дозиметры, предназначенные для измерения Hp(3), располагались на воротнике халата без ослабителя. Результаты измерений Hp(3) продемонстрировали, что набранная доза зависит от характера работ, оборудованности подразделения ядерной медицины, радионуклида и его активности как на рабочих местах персонала, так и суммарной за весь срок сбора данных. Высокие значения доз были получены у процедурных медсестер, радиохимиков и технологов, которые проводили работы с позитрон-излучающими радионуклидами (¹⁸F, ⁶⁸Ga и ¹¹C), которые при экстраполяции на год могут превышать 20 мЗв. Именно для этой категории персонала целесообразно проведение индивидуального дозиметрического контроля внешнего облучения хрусталиков глаз после предварительной оценки уровня облучения работников и оценки рисков высоких доз хрусталика глаза.

Ключевые слова: индивидуальный дозиметрический контроль, эквивалентная доза Hp(3), хрусталик глаза, ПЭТ, ядерная медицина, радиофармацевтические препараты, радиационная катаракта.

Шлеенкова Екатерина Николаевна

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: eshleenkova@mail.ru

Введение

В последние годы в перечне вопросов радиационного контроля и радиационной безопасности актуальным является вопрос облучения хрусталиков глаз. Радиационная катаракта является основным эффектом облучения хрусталика глаза, принято считать, что этот эффект является детерминированным, т.е. дозозависимым. По данным НКДАР ООН [1], риск возникновения радиационно-индуцированной катаракты оказался более высоким, чем это считалось ранее. Международная комиссия по радиационной защите (МКРЗ) в 2011 г. определила пороговое значение поглощенной дозы для образования катаракты хрусталика глаза равным 0,5 Гр [2] как для острого, так и для хронического облучения (предыдущее значение было равным 5 Гр). Был установлен предел дозы облучения хрусталика глаза, равный 20 мЗв в год, усредненный за 5 последовательных лет (100 мЗв за 5 лет), и 50 мЗв за любой отдельный год [2]. В отечественных нормативных документах (НРБ-99/2009¹, МУ 2.6.1.3015-12²) указан дозовый предел облучения хрусталика глаза, равный 150 мЗв в год, однако следует ожидать, что в ближайшие годы в России произойдет гармонизация с международными требованиями и снижение этого норматива до 20 мЗв в год.

Критической группой медицинского персонала считаются работники, занимающиеся интервенционными методами диагностики и лечения. Это подтверждается исследованиями, доказывающими высокие уровни доз облучения хрусталика глаза у данной категории медицинского персонала [3–9]. Данный факт объясняется тем, что при интервенционных процедурах персонал проводит операции под контролем рентгеновского излучения и находится в непосредственной близости к источнику излучения.

Другой группой персонала медицинских организаций с риском высоких доз облучения хрусталика глаза являются работники подразделений ядерной медицины, проводящие работы с радиофармпрепаратами (РФП), к ним относятся радиохимики и технологи, задействованные при изготовлении, контроле качества, измерении активности радионуклидов в РФП и упаковке в транспортный контейнер, а также медицинские сестры, которые осуществляют элюирование генераторов радионуклидов, изготовление, фасовку и введение РФП пациентам для проведения диагностических и терапевтических процедур. Отдельные исследования показывают, что у персонала, занятого изготовлением РФП для ПЭТ-диагностики, измеренные эквиваленты доз облучения хрусталика глаза $\text{Hr}(3)$ были в 3 раза выше доз $\text{Hr}(10)$, измеренных на грудной клетке [10]. Специалисты данной категории выполняют целый ряд операций с ИИИ, характеризующихся, во-первых, неоднородным облучением тела бета- и гамма-излучением в широком спектре энергий и, во-вторых, большой вариативностью мощностей доз на рабочих местах и продолжительностью процедур.

РФП изготавливаются как специализированными лабораториями по производству РФП, обеспечивающими работу ядерной медицины, так и непосредственно в ме-

дицинских организациях, которые изготавливают РФП из радионуклидов, соединяя их с сухим препаратом (лиофилизатом) [11], или путем синтеза РФП. Затем эти РФП вводятся пациентам для диагностики или лечения патологического процесса. Каждый этап работы с РФП в той или иной степени сопровождается воздействием ионизирующего излучения на персонал. В зависимости от оборудования подразделения ядерной медицины часть производственных процедур может выполняться автоматически (например, синтез РФП или фасовка), другие вручную (например, изготовление РФП, измерение активности радионуклидов в РФП, контроль качества РФП, введение РФП пациентам). Таким образом, наибольший интерес для изучения доз облучения хрусталиков глаз представляют лица из персонала, которые имеют непосредственный контакт с РФП, а именно лица, осуществляющие изготовление, фасовку, введение РФП, – это процедурные медсестры и радиохимики. Высокие рабочие активности радионуклидов, от нескольких десятков до нескольких тысяч мегабеккерелей (МБк), могут приводить к значительным уровням облучения хрусталика глаза у этой категории персонала.

Радионуклиды, используемые в ядерной медицине, можно разделить на три группы:

1) радионуклиды, используемые в однофотонной радионуклидной диагностике, включая однофотонную эмиссионную компьютерную томографию и сцинтиграфию, с энергией гамма-излучения преимущественно 100–200 кэВ (например, $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{123}I);

2) радионуклиды, используемые при проведении позитронно-эмиссионной томографии, которые характеризуются бета⁺-излучением и гамма-излучением энергии 511 кэВ (например, ^{18}F , ^{68}Ga , ^{11}C , ^{15}O). Энергия бета⁺-излучения наиболее распространенных радионуклидов ^{18}F , ^{68}Ga ниже 700 кэВ, которое не способно проникнуть в хрусталик глаза; энергия бета⁺-излучения ^{15}O и ^{11}C выше 700 кэВ, которое может вносить дополнительный вклад в дозу облучения хрусталика глаза [12].;

3) альфа- и бета-излучающие радионуклиды, используемые в терапии, с низким выходом гамма-излучения (например, ^{131}I , ^{89}Sr , ^{223}Ra).

В России около 90% всех исследований пациентов в однофотонной радионуклидной диагностике выполняются с РФП, меченными $^{99\text{m}}\text{Tc}$, который получают из молибден-технециевых генераторов радионуклидов непосредственно в центрах ядерной медицины [13]. В диагностике методом ПЭТ наиболее распространенным (около 90% всех ПЭТ-исследований) является исследование всего тела с ^{18}F -ФДГ для диагностики онкологических заболеваний [14].

Ряд зарубежных исследований продемонстрировал возможное превышение годовой дозы в хрусталике глаза в 20 мЗв (рекомендованный МАГАТЭ предел дозы) у персонала подразделений ядерной медицины (медицинские сестры и радиохимики) [15–20]. Так, были определены случаи трехкратного превышения годовой дозы 20 мЗв у работников радиофармацевтических производственных центров,

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

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

производящих ^{18}F -ФДГ для ПЭТ-диагностики [15]. Также было показано, что дозы облучения хрусталика глаза персонала производственных объектов, работающих с РФП на основе ^{18}F , выше, чем для персонала, маркирующего препараты с использованием $^{99\text{m}}\text{Tc}$ [17]. В другом исследовании было получено, что значения доз облучения хрусталика глаза радиохимиков, проводящих работы с ^{68}Ga (изготовление ^{68}Ga -DOTA-TATE), были до 7 раз выше по сравнению с работами с $^{99\text{m}}\text{Tc}$, а дозы у медицинских сестер, введших пациентам РФП, меченный ^{68}Ga , до 11 раз выше, чем при введении с $^{99\text{m}}\text{Tc}$ [16]. Обзор отечественных литературных источников показал малое количество информации о дозах облучения хрусталиков глаз персонала отечественных отделений ядерной медицины [21]. Согласно российским нормативным документам, контроль облучения хрусталиков глаз для данного персонала не предусматривается.

Цель исследования – оценка доз облучения хрусталиков глаз персонала медицинских организаций, проводящих работы с РФП; определение факторов, влияющих на дозу облучения хрусталика глаза персонала подразделений ядерной медицины; первичная оценка целесообразности и выявление категорий персонала для проведения рутинного контроля дозы облучения хрусталика глаза в отделениях ядерной медицины.

Материалы и методы

В рамках исследования были проведены измерения доз облучения хрусталика глаза персонала двух медицинских организаций города Санкт-Петербурга, осуществляющих работы с РФП. Длительность контроля – 1 месяц.

Персонал был поделён на две группы в зависимости от типа радионуклидов в РФП, с которыми проводились работы (табл. 1):

- персонал отделений ПЭТ-диагностики и изготовления РФП, в которых проводят работы с РФП, мечеными позитрон-излучающими радионуклидами (^{11}C , ^{18}F , ^{68}Ga), – медсестры (4 человека), технологи (6 человек), радиохимики (3 человека).
- персонал отделений радионуклидной диагностики и терапии, в которых проводят работы с РФП, мечеными радионуклидами ^{89}Sr (бета-излучение с энергией 1,492 МэВ), $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (гамма-излучение с энергией 140 кэВ (90%), ^{123}I (гамма-излучение с энергией 159 кэВ (83,4%), – медсестры (7 человек).

Измерения доз облучения хрусталика глаза были проведены с помощью индивидуальных термoluminescentных дозиметров типа МКД-А, содержащих по одному детектору ДТГ-4 (LiF: Mg, Ti). Дозиметр располагался на воротнике халата или на средствах индивидуальной защиты (защитные фартуки и воротники), т.е. без ослабителей излучения в период проведения всех манипуляций персонала с ИИИ. Все манипуляции, виды радионуклидов, а также их активности были записаны в специальный дневник. Каждый дозиметр имел уникальную маркировку и был использован персонально без передачи и обмена между участниками контролируемых групп. Дозиметры экспонировались в реальных рабочих условиях при выполнении персоналом привычных манипуляций, согласно типовым сценариям работы.

Для соотнесения доз облучения хрусталика глаза с эффективными дозами дополнительно работникам были розданы дозиметры DTU-01 для измерения индиви-

Таблица 1

Категории обследованных работников, проводящих работы с радиофармацевтическими препаратами

[Table 1]

Categories of surveyed workers working with radiopharmaceuticals

Медицинская организация [Medical facility]	Персонал [Staff]	Количество обследованных сотрудников [Number of monitored workers]	Радионуклиды в РФП [Radionuclides in radiopharmaceuticals]	Манипуляции с РФП [Manipulation of radiopharmaceuticals]
МО-1* [MO-1]*	Медицинские сестры [Nurses]	5	$^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{123}I	Изготовление и фасовка РФП по шприцам, измерение активности каждого шприца, введение РФП пациентам [manufacturing and packing of syringes, measuring the activity of each syringe, injection to patients]
	Медицинские сестры [Nurses]	1	^{18}F , ^{11}C , ^{68}Ga	Фасовка РФП по шприцам, введение РФП пациентам [packing of syringes, injection to patients]
	Технологи [Technologists]	4	^{18}F , ^{11}C , ^{68}Ga	Синтез РФП, измерение и упаковка в транспортный контейнер, фасовка РФП по шприцам [synthesis, measuring the activity and packaging in a transport container, packing of syringes]
	Радиохимики [Radiochemists]	2	^{18}F , ^{11}C , ^{68}Ga	Синтез РФП, контроль качества РФП [synthesis, quality control]

Окончание таблицы 1

Медицинская организация [Medical facility]	Персонал [Staff]	Количество обследованных сотрудников [Number of monitored workers]	Радионуклиды в РФП [Radionuclides in radio-pharmaceuticals]	Манипуляции с РФП [Manipulation of radiopharmaceuticals]
МО-2**	Медицинские сестры [Nurses]	2	^{99m}Tc , ^{89}Sr	Изготовление и фасовка РФП по шприцам, измерение активности каждого шприца, введение РФП пациентам [manufacturing and packing of syringes, measuring the activity of each syringe, injection to patients]
	Медицинские сестры [Nurses]	3	^{18}F , ^{11}C , ^{68}Ga	Фасовка РФП по шприцам, измерение активности каждого шприца, введение РФП пациентам [packing of syringes, measuring the activity of each syringe, injection to patients]
	Технологи [Technologists]	2	^{18}F , ^{11}C , ^{68}Ga	Синтез РФП, измерение и упаковка в транспортный контейнер, отбор проб, транспортирование РФП [synthesis, measuring the activity and packaging in a transport container, sampling, transportation]
	Радиохимики [Radiochemists]	1	^{18}F , ^{11}C , ^{68}Ga	Контроль качества РФП [quality control]

*Медицинская организация-1

**Медицинская организация-2

[*Medical organization-1

**Medical organization-2]

дуального эквивалента дозы $H_p(10)$, которые носились на груди.

Показания детекторов были считаны на термолюминесцентной установке ДВГ-02ТМ. Основная погрешность результатов измерений $H_p(3)$ и $H_p(10)$, согласно свидетельству о поверке, составляет $\pm 30\%$ ($P=0,95$). Диапазон измерения значений индивидуального эквивалента дозы $H_p(3)$ – от 0,1 мЗв до 100 Зв. Для оценки годовой дозы полученные в результате измерений дозы были экстраполированы на 11 рабочих месяцев.

Статистическая обработка данных была выполнена с использованием программного обеспечения Statistica 10. Для описания количественных показателей использовали методы параметрической статистики. Для определения взаимосвязи показателей между собой использовали корреляционный анализ Спирмена. Взаимосвязь между параметрами считалась достоверной при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

В таблице 2 представлены результаты измерения доз облучения хрусталиков глаз для персонала подразделений ядерной медицины, также представлены данные об активностях радионуклидов и проводимых процедурах. Исходя из зафиксированных в дневниках работников активностей, в основном, проводились работы с радионуклидами ^{18}F в ПЭТ-диагностике (первая группа) и ^{99m}Tc в однофотонной радионуклидной диагностике (вторая группа). Соответственно, можно предположить, что рабо-

ты с этими радионуклидами вносили наибольший вклад в дозу каждого работника.

Как видно на рисунке, наибольшие дозы были зафиксированы у технологов из первой группы, которые проводят синтез РФП, меченных позитрон-излучающими радионуклидами, измерение флаконов и их упаковку, а также транспортирование в подразделения ПЭТ-диагностики (медиана 1,3 мЗв за обследованный месяц), также относительно большие дозы были зафиксированы у радиохимиков, которые задействованы в синтезе и контроле качества РФП для ПЭТ-диагностики (медиана 0,76 мЗв за обследованный месяц). Дозы медицинских сестер, работающих в ПЭТ-диагностике, которые занимаются фасовкой РФП по шприцам, измерением активностей радионуклидов в РФП перед введением пациенту и введением РФП пациенту (медиана 0,55 мЗв за обследованный месяц), были выше, по сравнению с медицинскими сестрами, работающими с ^{99m}Tc , ^{123}I и ^{89}Sr (медиана 0,34 мЗв за обследованный месяц).

Для выявления факторов, оказывающих влияние на дозу облучения хрусталика глаза при работе с РФП, был проведен анализ взаимосвязи между дозами и активностями основных радионуклидов, с которыми проводились работы (табл. 3). Анализ продемонстрировал низкую корреляцию доз облучения хрусталика глаза и активности радионуклидов у медицинских сестер и радиохимиков, проводивших работы с позитрон-излучающими радионуклидами, для других групп взаимосвязь отсутствовала.

Таблица 2
Активность радионуклидов в РФП (ГБк), с которыми проводились работы за весь период обследования, и дозы облучения хрусталиков глаз обследованного персонала по группам (мЗв) за один месяц наблюдения

[Table 2]

Activity of radionuclides in radiopharmaceuticals (GBq) and the doses of the eye lenses of the examined staff (mSv) for investigated month]

Персонал [Staff]	Радионуклид [Radionuclide]	Активность, ГБк [Activity, GBq]	Манипуляции [Manipulation]	Доза облучения хрусталика глаза, мЗв [The dose for the eye lens, mSv]
Первая группа [First group]				
Медицинская сестра-1 (МО-1) [Nurse-1 (MO-1)]	⁶⁸ Ga	23,3	Фасовка, измерение, введение РФП [packaging, measurement, injection]	0,91
	¹⁸ F	421,5		
	¹¹ C	24		
Технолог-1 (МО-1) [Technologist-1 MO-1]	⁶⁸ Ga	68	Синтез РФП, измерение, упаковка [synthesis, measurement, packaging]	2,11
	¹⁸ F	552,4		
	¹¹ C	71,5		
Технолог-2 (МО-1) [Technologist-2 MO-1]	⁶⁸ Ga	26,2	Синтез РФП, измерение, упаковка [synthesis, measurement, packaging]	0,77
	¹⁸ F	421,5		
	¹¹ C	42,71		
Технолог-3 (МО-1) [Technologist-3 MO-1]	⁶⁸ Ga	17	Синтез РФП, измерение, упаковка [synthesis, measurement, packaging]	1,36
	¹⁸ F	295,5		
	¹¹ C	42		
Технолог-4 (МО-1) [Technologist-4 MO-1]	⁶⁸ Ga	14	Синтез РФП, измерение, упаковка [synthesis, measurement, packaging]	0,81
	¹⁸ F	475		
	¹¹ C	12		
Радиохимик-1 (МО-1) [Radiochemist-1 (MO-1)]	⁶⁸ Ga	66,1	Синтез, контроль качества РФП [synthesis, quality control]	0,86
	¹⁸ F	224,9		
	¹¹ C	70,5		
Радиохимик-2 (МО-1) [Radiochemist-2 (MO-1)]	⁶⁸ Ga	53,4	Синтез, контроль качества РФП [synthesis, quality control]	0,76
	¹⁸ F	178,2		
	¹¹ C	—		
Медицинская сестра-1 (МО-2) [Nurse-1 (MO-2)]	⁶⁸ Ga	5,4	Фасовка, измерение, введение РФП [packaging, measurement, injection]	0,56
	¹⁸ F	7,8		
	¹¹ C	6,3		
Медицинская сестра-2 (МО-2) [Nurse-2 (MO-2)]	⁶⁸ Ga	4,9	Фасовка, измерение, введение РФП [packaging, measurement, injection]	0,49
	¹⁸ F	10,85		
	¹¹ C	3,7		
Медицинская сестра-3 (МО-2) [Nurse-3 (MO-3)]	⁶⁸ Ga	4,1	Фасовка, измерение, введение РФП [packaging, measurement, injection]	0,54
	¹⁸ F	11,9		
	¹¹ C	5,5		
Технолог-1 (МО-2) [Technologist-1 MO-2]	⁶⁸ Ga	7,6	Синтез РФП, упаковка [synthesis, packaging]	1,17
	¹⁸ F	124,3		
	¹¹ C	—		
Технолог-2 (МО-2) [Technologist-2 MO-2]	⁶⁸ Ga	33,6	Транспортирование [transportation]	2,06
	¹⁸ F	211,6		
	¹¹ C	25,5		
Радиохимик-1 (МО-2) [Radiochemist-1 (MO-2)]	⁶⁸ Ga	0,32	Контроль качества РФП [synthesis, quality control]	0,21
	¹⁸ F	11,4		
	¹¹ C	0,31		

Персонал [Staff]	Радионуклид [Radionuclide]	Активность, ГБк [Activity, GBq]	Манипуляции [Manipulation]	Доза облучения хрусталика глаза, мЗв [The dose for the eye lens, mSv]
Вторая группа [Second group]				
Медицинская сестра-1 (МО-1) [Nurse-1 (MO-1)]	^{99m}Tc	541,7	Изготовление, введение РФП [production, injection]	0,21
Медицинская сестра-2 (МО-1) [Nurse-2 (MO-1)]	^{99m}Tc	226,9	Изготовление, фасовка, измерение, введение РФП [production, packaging, measurement, injection]	0,58
Медицинская сестра-3 (МО-1) [Nurse-3 (MO-1)]	^{99m}Tc	226,9	Изготовление, фасовка, измерение, введение РФП [production, packaging, measurement, injection]	0,57
Медицинская сестра-4 (МО-1) [Nurse-4 (MO-1)]	^{99m}Tc	229,8	Изготовление, фасовка, измерение, введение РФП [production, packaging, measurement, injection]	0,56
Медицинская сестра-5 (МО-1) [Nurse-5 (MO-1)]	^{99m}Tc	229,8	Изготовление, фасовка, измерение, введение РФП [production, packaging, measurement, injection]	0,34
Медицинская сестра-1 (МО-2) [Nurse-1 (MO-2)]	^{99m}Tc	129,9	Изготовление, фасовка, измерение, введение РФП [production, packaging, measurement, injection]	0,31
Медицинская сестра-2 (МО-2) [Nurse-2 (MO-2)]	^{89}Sr	1,4	Изготовление, фасовка, измерение, введение РФП [production, packaging, measurement, injection]	0,25
	^{89}Sr	1,4		

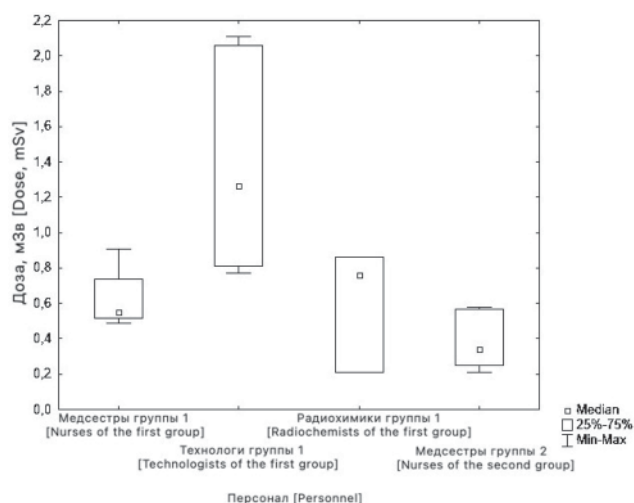


Рис. Разброс доз облучения хрусталика глаза за месяц для обследованных групп персонала
[Fig. The range of doses to eye lens of the monitored workers for investigated month]

Полученные результаты указывают на множество факторов, оказывающих влияние на дозы облучения хрусталика глаза работников подразделений ядерной медицины: специализация работника, радионуклиды и их активности, проводимые технологические процедуры и манипуляции с ИИИ, а также оборудованность подразделений и применение на практике работником основных

принципов радиационной защиты (экранирование, время, расстояние). Дозы облучения выбранной категории персонала формируются, в основном, за счет кратковременных процедур, проводимых с ИИИ, поэтому большую роль играет число таких процедур, проводимых за смену, их сложность, время, затраченное на их выполнение, а также оптимизация работы и радиационной защиты в рабочих помещениях и подготовка и опыт работников. Так, например, наличие автоматического фасовщика или оборудования для автоматического введения РФП пациентам может существенно снизить дозы облучения персонала. Отсутствие выраженной зависимости дозы облучения хрусталика глаза от активности радионуклидов для отдельных групп работников, выполняющих однотипные манипуляции, как и в работе Dabin и др. 2016 [18], указывает на различное выполнение технологических процедур, разные скорости и возможное пренебрежение средствами радиационной защиты при отдельных манипуляциях с ИИИ. Применение защитного просвинцованного стекла на рабочем месте медицинской сестры при фасовке РФП или радиометр для измерения активности радионуклидов в РФП, установленный за экранирующим оборудованием, способны существенно снизить уровни облучения хрусталика глаза работников.

Характер работ и характеристики излучения радионуклида также оказывают влияние на дозу облучения хрусталика глаза работников. Полученные относительно высокие дозы у медицинских сестер, работающих с позитрон-излучающими радионуклидами, по сравнению с медицинскими

Таблица 3
Статистические параметры корреляции дозы облучения хрусталика глаза и активности основного радионуклида (^{18}F для первой группы, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ для второй группы)

[Table 3]

Correlation between the dose of the eye lens and the activity of the main radionuclide (^{18}F for the first group, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ for the second group)

Персонал* [Staff*]	p	r ²
Медицинские сестры первой группы [Nurses of the first group]	0,01	0,98
Технологи первой группы [Technologists of the first group]	ns**	–
Радиохимики первой группы [Radiochemists of the first group]	0,04	0,99
Медицинские сестры второй группы [Nurses of the second group]	ns**	–

*первая группа – РФП на основе ^{18}F , ^{68}Ga , ^{11}C ; вторая группа – РФП на основе $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{89}Sr , ^{123}I .

**ns = non-significant (недостаточно).

[* the first group – radiopharmaceuticals labeled with ^{18}F , ^{68}Ga , ^{11}C ; the second group – radiopharmaceuticals labeled with $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{89}Sr , ^{123}I .

** ns = non-significant.]

ми сестрами, проводящими работы с РФП на основе $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{89}Sr , ^{123}I , могут быть связаны как с разными технологическими процедурами, выполняемыми медицинскими сестрами двух групп, так и с различным излучением радионуклидов и защитным оборудованием помещения, в котором проводятся работы. Медицинские сестры, работавшие с $^{99\text{m}}\text{Tc}$, помимо фасовки РФП по шприцам, измерения активности в них и введения РФП пациентам, проводили элюирование раствора $^{99\text{m}}\text{Tc}$ из генератора и изготовление РФП смешиванием его с лиофилизатом, что связано с дополнительными процедурами с ИИИ. Особенностью работы с позитрон-излучающими радионуклидами является гамма-излучение с высокой проникающей способностью, которое требует большую толщину и плотность ослабителей для снижения

мощности дозы на рабочем месте персонала, а также наличие дополнительного бета+-излучения, что приводит к высоким мощностям дозы на рабочих местах персонала при работе с ИИИ. Индивидуальные средства защиты, такие как фартуки, воротники и очки, не используют при работе в подразделениях ПЭТ-диагностики в связи с их неэффективностью.

Исходя из результатов измерений доз за один месяц, были оценены предполагаемые годовые эквивалентные и эффективные дозы внешнего облучения хрусталика глаза при проведении работ с различными РФП у этих работников (табл. 4), исходя из предположения, что характер работы каждого сотрудника будет неизменным, а также с учетом ежегодного отпуска персонала (1 месяц).

Таблица 4

Оценки годовой эквивалентной дозы облучения хрусталика глаза и эффективной дозы обследованных групп персонала на основании проведенных в работе измерений

[Table 4]

Estimated annual equivalent dose of the eye lens and effective dose of the monitored groups of staff

Персонал* [Staff*]	Предполагаемая годовая доза облучения хрусталика глаза, мЗв [Expected annual dose of irradiation of the eye lens, mSv]		Предполагаемая годовая эффективная доза, мЗв [Expected annual effective dose, mSv]	
	Медиана [Median]	Максимальное значение [Maximum value]	Медиана [Median]	Максимальное значение [Maximum value]
Медицинские сестры первой группы [Nurses of the first group]	6	10	5	9
Технологи первой группы [Technologists of the first group]	14	23	11	15
Радиохимики первой группы [Radiochemists of the first group]	8	9	8	10
Медицинские сестры второй группы [Nurses of the second group]	4	6	4	8

*первая группа – РФП на основе ^{18}F , ^{68}Ga , ^{11}C ; вторая группа – РФП на основе $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{89}Sr , ^{123}I

[*the first group – radiopharmaceuticals labeled with ^{18}F , ^{68}Ga , ^{11}C ; the second group – radiopharmaceuticals labeled with $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{89}Sr , ^{123}I]

Предполагаемые значения годовой дозы, приведенные в таблице 4, показывают, что возможны случаи, когда значение эквивалентной дозы внешнего облучения хрусталика глаза персонала, задействованного при изготовлении, контроле качества, фасовке, упаковке и транспортировании РФП для ПЭТ-диагностики, превышает 20 мЗв (23 мЗв). Полученные значения доз облучения хрусталика глаза оказались сопоставимы с эффективными дозами. Годовые значения эквивалентной дозы внешнего облучения хрусталика глаза для персонала, работающего в подразделениях однофотонной радионуклидной диагностики и терапии с РФП на основе (^{99m}Tc , ^{89}Sr , ^{123}I), в 3 раза ниже рекомендованного Стандартом МАГАТЭ предела дозы для хрусталика глаза [2], схожие результаты были получены и в других работах по оценке уровней облучения хрусталика глаза данной категории персонала [18,19]. Поэтому по результатам предварительно проведенной работы можно выделить персонал подразделений ядерной медицины, проводящий работы с позитрон-излучающими радионуклидами, в качестве группы с вероятностью превышения годовой дозы облучения хрусталика глаза в 20 мЗв, для которой целесообразно проведение контроля дозы облучения хрусталика глаза. С целью выявления вероятности превышения годовой дозы облучения хрусталика глаза в 20 мЗв и необходимости регулярного ИДК дозы облучения хрусталика глаза у работников данной категории персонала возможно использование показаний дозиметров для измерения индивидуального эквивалента дозы $\text{Hr}(10)$, расположенных на груди [18].

Заключение

Проведенное исследование показало, что на практике для сотрудников подразделений, выполняющих диагностические исследования с использованием различных радионуклидов, возможно получение существенных доз облучения хрусталика глаза (более 20 мЗв за год). Доза облучения работника зависит от множества факторов, таких как характер выполняемых манипуляций с ИИИ, оборудованности подразделения ядерной медицины, применяемых радионуклидов, рабочих активностей, загрузки работника, а также скорости выполнения им процедур.

Предварительные результаты измерений $\text{Hr}(3)$ показали, что персонал, занимающийся ПЭТ-диагностикой, а именно процедурные медицинские сестры, радиохимики и технологи, могут иметь высокие дозы внешнего облучения хрусталиков глаз. Именно для этой категории персонала целесообразно проведение индивидуального дозиметрического контроля внешнего облучения хрусталиков глаз после предварительной оценки индивидуального эквивалента дозы $\text{Hr}(10)$ и оценки вероятности превышения предела дозы облучения хрусталика глаза 20 мЗв в год, рекомендованного МАГАТЭ.

Благодарности

Авторы выражают свою благодарность сотрудникам подразделений ядерной медицины ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова» и ФГБУ «Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова» за помощь при сборе данных.

Литература

- Summary of Low-Dose Radiation Effects on Health. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR 2010). 2011. P. 51-64.
- Международное Агентство по Атомной Энергии. Радиационная Защита и Безопасность Источников Излучения: Международные Основные Нормы Безопасности. Общие требования безопасности. Серия норм МАГАТЭ по безопасности, № GSR Part 3. Вена: МАГАТЭ, 2015. 518 с.
- Vanhavere F., Carinou E., Domienik J., et al. Measurements of eye lens doses in interventional radiology and cardiology: Final results of the ORAMED project // Radiation Measurements. 2011.
- Кайдановский Г.Н., Шлеенкова Е.Н. О проблемах контроля доз облучения хрусталика глаза // Радиационная гигиена. 2016. Т. 9, № 3. С. 75-80.
- Шлеенкова Е.Н., Голиков В.Ю., Кайдановский Г.Н., и др. Результаты контроля доз облучения хрусталиков глаз у медицинского персонала г. Санкт-Петербурга // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 4. С. 29-36.
- Иванов С.И., Логинова С.В., Аكوпова Н.А., и др. Проблемы дозиметрии хрусталика глаза // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2014. Т. 59, № 4. С. 67-72.
- ICRP, 2018. Occupational radiological protection in interventional procedures. ICRP Publication 139. Ann. ICRP. 2018. 47(2).
- Рыжкин С.А., Слесарева А.Н., Галеева Г.З., Иванов С.И. Клиническое изучение органа зрения и дозиметрия хрусталика глаза персонала, выполняющего хирургические вмешательства под контролем рентгеновского излучения // Радиация и риск. 2017. Т. 26, № 3. С. 90-99.
- Рыжов С.А., Алехнович А.В., Аكوпова Н.А., и др. Оценка дозы на хрусталик как элемент внутреннего аудита в отделениях эндоваскулярной диагностики и лечения // Материалы и методы четвертого всероссийского научно-образовательного конгресса с международным участием «Онкорadiология, лучевая диагностика и терапия» 12–13 февраля 2021 г., Москва, 2021. С. 34-36.
- Kubo A.L.S.L., Mauricio C.L.P. TLD occupational dose distribution study in nuclear medicine // Radiation Measurements. 2014. Vol. 71. P. 442 – 446.
- Звонова И.А., Чипига Л.А., Балонов М.И., Сухов В.Ю. Радионуклидная диагностика в Санкт-Петербурге: текущее состояние и проблемы развития // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 4. С. 32–41.
- Guidelines for Radiation Protection and Dosimetry of the Eye Lens. Nederlandse Commissie Voor Stralingsdosimetrie. Report 31 of the Netherlands Commission on Radiation Dosimetry, May 2018.
- Балонов М.И., Голиков В.Ю., Звонова И.А., и др. Современные уровни медицинского облучения в России // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 3. С. 67–79.
- Чипига Л.А., Звонова И.А., Рыжкова Д.В., и др. Уровни облучения пациентов и возможные пути оптимизации ПЭТ-диагностики в России // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 4. С. 31-43.
- 18F-FDG production procedures as a source of eye lens exposure to radiation // Journal of Radiological Protection. 2018. Vol. 38. P. 382–393.
- 68Ga-DOTA-TATE—a source of eye lens exposure for nuclear medicine department workers // Journal of Radiological Protection. 2018. Vol. 38. P. 1512–1523.
- Is eye lens dosimetry needed in nuclear medicine? // Journal of Radiological Protection. 2018. Vol. 38. P. 1512–1523.
- Dabin J., Kopeć R., Struelens L., et al. Eye lens doses in nuclear medicine: a multicentric study in Belgium and Poland // Radiation Protection Dosimetry. 2016. Vol. 170, Issue 1-4. P. 297–301.

19. Summers E.C., Brown Ja.L.E., Bownes P.J., Anderson Sh.E. Eye doses to staff in a nuclear medicine department // Nuclear Medicine Communications. 2012. Vol. 33, Issue 5. P. 476-480.
20. Bellamy M.B., Miodownik D., Quinn B., Dauer L. Occupational eye lens dose over six years in the staff of a us high-volume cancer center // Radiation Protection Dosimetry. 2020. Vol. 192, Issue 3. P. 321-327.
21. Охрименко С.Е., Коренков И.П., Прохоров Н.И., и др. Радиационно-гигиеническая оценка современных медицинских технологий // Гигиена и санитария. 2020. Т. 99, № 9. С. 939-946.

Поступила: 02.08.2021 г.

Шлеенкова Екатерина Николаевна – младший научный сотрудник лаборатории радиационного контроля Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: eshleenkova@mail.ru

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

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

Чипига Лариса Александровна – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева; научный сотрудник Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова Минздрава России; доцент кафедры ядерной медицины и радиационных технологий Национального медицинского исследовательского центра им. В.А. Алмазова Минздрава России, Санкт-Петербург, Россия

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

Для цитирования: Шлеенкова Е.Н., Бажин С.Ю., Кайдановский Г.Н., Чипига Л.А., Ильин В.А. О необходимости проведения регулярного контроля доз облучения хрусталиков глаз у персонала, занятого на работах с использованием радиофармацевтических препаратов // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 3. С. 101-111. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-101-111

About the requirements of regular monitoring of doses for the eye lens of the staff working with radiopharmaceuticals

Ekaterina N. Shleenkova¹, Stepan Yu. Bazhin¹, Georgiy N. Kaidanovsky¹, Larisa A. Chipiga^{1,2,3}, Vladimir A. Ilyin¹

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 Granov Russian Research Center of Radiology and Surgical Technologies, Saint-Petersburg, Russia

³ V. Almazov National Medical Research Center, Saint-Petersburg, Russia

In 2011 the International Commission on Radiation Protection established the threshold value of the absorbed dose in the lens of the eye for the development of cataract equal to 0.5 Gy for acute and chronic exposure. A dose limit for exposure of the lens of the eye was established equal to 20 mSv per year, averaged

Ekaterina N. Shleenkova

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

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

over five consecutive years (100 mSv over 5 years), and 50 mSv for any single year. The Russian regulatory documents specify the dose limit for the exposure of the eye lens equal to 150 mSv per year and there are no clear criteria determining the conditions under which it is necessary to carry out individual monitoring of exposure of the eye lens, but it should be expected that in Russia the dose limit will also be reduced in the coming years. Objectives of the study: assessment of the absorbed doses in the eye lenses of the staff of medical facilities working with radiopharmaceuticals; identification of the relationship between the absorbed dose in the eye lens and the type and range of activities of the radionuclides; justification of the feasibility and identification of categories of staff for regular individual monitoring of the eye lens doses in nuclear medicine departments. Within the framework of the study, the absorbed dose in the eye lens for staff members working with the radiopharmaceuticals in nuclear medicine departments of two medical facilities in St. Petersburg were measured, the possibility of detection of high eye lens doses for these workers was analyzed. The monitoring period was set to 1 month. The workers were divided into two groups depending on the type of radionuclides in the radiopharmaceuticals they commonly work with: 1) the staff of the PET departments and the radiochemistry units working with radiopharmaceuticals labeled with positron emitting radionuclides (^{11}C , ^{18}F , ^{68}Ga) 2) the staff of the departments of nuclear medicine working with radiopharmaceuticals labeled with ^{89}Sr , $^{99\text{m}}\text{Tc}$. Measurements of the operational quantity $H_p(3)$ were carried out by the method of thermoluminescent dosimetry. We used individual dosimeters that met the conditions for determining the operating values. Dosimeters designed to measure $H_p(3)$ were located on the collar of a dressing gown without an attenuator. The results of measurements of $H_p(3)$ indicated that the collected dose depends on the type of the work, the equipment of the nuclear medicine unit, the radionuclide and its activity both at the workplaces and for the entire period of data collection. High dose values were obtained for procedural nurses, radiochemists and technologists who worked with positron-emitting radionuclides (^{18}F , ^{68}Ga and ^{11}C), which, when extrapolated to a year, can exceed 20 mSv. For this category of workers, it is advisable to carry out individual monitoring of external irradiation of the eye lenses after a preliminary assessment of the level of exposure of workers and an assessment of the risks of high doses of the eye lens.

Key words: individual monitoring, dose equivalent $H_p(3)$, the eye lens, PET, nuclear medicine, radiopharmaceuticals, radiation cataracts.

References

- Summary of Low-Dose Radiation Effects on Health. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR 2010); 2011. P. 51-64.
- International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. GSR Part 3. Vienna: IAEA; 2015. 518 p. (In Russian).
- Vanhavere F, Carinou E, Domienik J, et al. Measurements of eye lens doses in interventional radiology and cardiology: Final results of the ORAMED project. *Radiation Measurements*. 2011.
- Kaydanovsky GN, Shleenkova EN. On problems of the lens of the eye radiation dose monitoring. *Radiatsionnaya Gygiya = Radiation Hygiene*. 2016;9(3): 75-80 (In Russian).
- Shleenkova EN, Golikov VYu, Kaidanovsky GN, Bazhin SYu, Ilyin VA. Results of eye lens doses control of medical personnel in St.-Petersburg. *Radiatsionnaya Gygiya = Radiation Hygiene*. 2019;12(4): 29-36. (In Russian).
- Ivanov SI, Loginova SV, Akopova NA, Okhrimenko SYe, Nurybayev KN. Problems of eye lens dosimetry. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2014;59(4): 67-72 (In Russian).
- ICRP, 2018. Occupational radiological protection in interventional procedures. ICRP Publication 139. Ann. ICRP; 2018. 47(2).
- Ryzhkin SA, Slesareva AN, Galeeva GZ, Ivanov SI. Clinical examination of the eyes functional status and assessment of equivalent dose to eye lens in medical staff performing endovascular interventions under X-ray guidance. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2017;26(3): 90-99 (In Russian).
- Ryzhov SA, Alekhovich AV, Akopova NA, Ermolina EP, Druzhinina YuV, Ryzhkin SA. Lens dose assessment as an element of internal audit in endovascular diagnostics and treatment departments. Materials and methods of the fourth all-Russian scientific and educational congress with international participation «Oncoradiology, radiation diagnostics and therapy». February 12-13, 2021, Moscow; 2021. P. 34-36 (In Russian).
- Kubo ALSL, Mauricio CLP. TLD occupational dose distribution study in nuclear medicine. *Radiation Measurements*. 2014;71: 442 – 446.
- Zvonova IA, Chipiga LA, Balonov MI, Sukhov VYu. Radionuclide diagnostics in St.-Petersburg: current status and development challenges. *Radiatsionnaya Gygiya = Radiation Hygiene*. 2015;8(4): 32-41 (In Russian).
- Guidelines for Radiation Protection and Dosimetry of the Eye Lens. Nederlandse Commissie Voor Stralingsdosimetrie. Report 31 of the Netherlands Commission on Radiation Dosimetry, May 2018.
- Balonov MI, Golikov VYu, Zvonova IA, Kalnitsky SA, Repin VS, Sarycheva SS, et al. Current Levels of Medical Exposure in Russia. *Radiatsionnaya Gygiya = Radiation Hygiene*. 2015;8(3): 67-79 (In Russian).
- Chipiga LA, Zvonova IA, Ryzhkova DV, Menkov MA, Dolgushin MB. Levels of Patients Exposure and a Potential for Optimization of the PET Diagnostics in the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiya = Radiation Hygiene*. 2017;10(4): 31-43 (In Russian).
- ^{18}F -FDG production procedures as a source of eye lens exposure to radiation. *Journal of Radiological Protection*. 2018;38: 382–393.
- ^{68}Ga -DOTA-TATE—a source of eye lens exposure for nuclear medicine department workers. *Journal of Radiological Protection*. 2018;38: 1512–1523.
- Is eye lens dosimetry needed in nuclear medicine? *Journal of Radiological Protection*. 2018;38: 1512–1523.
- Dabin J, Kopeć R, Struelens L, Szumska A, Tomaszuk M, Vanhavere F. Eye lens doses in nuclear medicine: a multicentric study in Belgium and Poland. *Radiation Protection Dosimetry*. 2016;170(1-4): 297–301.
- Summers EC, Brown JaLE, Bownes PJ, Anderson ShE. Eye doses to staff in a nuclear medicine department. *Nuclear Medicine Communications*. 2012;33(5): 476-480.
- Bellamy MB, Miodownik D, Quinn B, Dauer L. Occupational eye lens dose over six years in the staff of a us high-volume cancer center. *Radiation Protection Dosimetry*. 2020;192(3): 321–327.

21. Okhrimenko SE, Korenkov IP, Prokhorov NI, Shandala NK, Zakharova AV. Radiation-hygienic assessment of modern

medical technologies. *Gygienna i Sanitariya = Hygiene and Sanitation*. 2020;99(9): 939-946 (In Russian).

Received: August 02, 2021

For correspondence: Ekaterina N. Shleenkova – Junior Researcher of the Laboratory of Radiation Control, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: eshleenkova@mail.ru)

Stepan Yu. Bazhin – Head of the Laboratory of Radiation Control, Senior Researcher, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

Georgiy N. Kaidanovsky – acting Leading Researcher of the Laboratory of Radiation Control, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

Larisa A. Chipiga – Ph.D., research fellow, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev; research fellow, Granov Russian Research Center of Radiology and Surgical Technologies; docent, Almazov National Medical Research Centre, Saint-Petersburg, Russia

Vladimir A. Ilyin – Technician-Researcher at the Laboratory of Radiation Control, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

For citation: Shleenkova E.N., Bazhin S.Yu., Kaidanovsky G.N., Chipiga L.A., Ilyin V.A. About the requirements of regular monitoring of doses for the eye lens of the staff working with radiopharmaceuticals. *Radiatsionnaya Gygienna = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No. 3. P. 101-111. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-101-111

Итоги 20 лет функционирования Федерального банка данных по дозам природного облучения населения Российской Федерации

Т.А. Кормановская¹, Р.Р. Ахматдинов¹, Г.А. Горский^{2,3}

¹ Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

² Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по городу Санкт-Петербургу, Санкт-Петербург, Россия

³ Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

В статье приведен анализ результатов функционирования Федерального банка данных по дозам облучения граждан Российской Федерации за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона в рамках Единой государственной системы контроля и учета доз облучения в период 2001–2020 гг. Оценка средней индивидуальной годовой эффективной дозы облучения населения Российской Федерации за счет природных источников ионизирующего излучения, рассчитанная на основе данных всех измерений 2001–2020 г., составила 3,36 мЗв/год. В работе проанализированы проблемы и перспективы совершенствования системы сбора данных об уровнях облучения населения Российской Федерации за счет природных источников.

Ключевые слова: природные источники ионизирующего излучения, индивидуальные эффективные дозы природного облучения, Единая государственная система контроля и учета доз облучения, Федеральный банк данных по дозам облучения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона.

Введение

Постановлением Правительства Российской Федерации от 16.06.97 г. № 718¹ был установлен порядок создания и функционирования единой государственной системы контроля и учета доз облучения населения (ЕСКИД), неотъемлемой частью которой является система сбора, хранения, учета и анализа данных об уровнях облучения населения Российской Федерации за счет природных источников ионизирующего излучения (ПИИИ) на базе формы федерального статистического наблюдения № 4-ДОЗ. Для обеспечения работы системы в соответствии с Приказом Минздрава Российской Федерации от

31.07.00 г. № 298² в России был создан и функционирует с 2001 г. по настоящее время Федеральный банк данных по дозам облучения граждан Российской Федерации за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона (ФБДОПИ). Актуальность проводимой работы подтверждена «Основами государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу», утвержденными Указом Президента Российской Федерации от 13.10.2018 г. № 585³, в соответствии с которыми «совершенствование информационного обеспечения в области анализа и

¹ Постановление Правительства Российской Федерации от 16.06.97 г. № 718 «О порядке создания единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан» [Decree of the government of the Russian Federation #718, 16.06.1997 "On the order of the development of the joint governmental system of control and accounting on the individual doses of the citizens" (In Russ.)]

² Приказ Минздрава Российской Федерации от 31 июля 2000 г. № 298 «Об утверждении Положения о единой государственной системе контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан» [Order of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation #298, 31.07.2000, 13.10. "On the establishment of the Provision on the joint governmental system of control and accounting on the individual doses of the citizens" (In Russ.)]

³ Указ Президента РФ от 13 октября 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» [Decree of the President of the Russian Federation No 585, 13.10.2018, "On the establishment of the Principles of the governmental policy in the field of the provision of the nuclear and radiation safety of the Russian Federation up to 2025 and for the later perspective" (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

прогнозирования радиационной обстановки, в том числе развитие единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан» является одним из основных направлений реализации государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности.

Цель исследования – анализ результатов функционирования ФБДОПИ в период 2001–2020 гг., оценка средних индивидуальных годовых эффективных доз облучения населения Российской Федерации за счет ПИИИ, анализ проблем и перспектив совершенствования системы сбора данных об уровнях облучения населения Российской Федерации за счет ПИИИ.

Разработка и внедрение автоматизированной системы сбора информации об уровнях природного облучения населения

Исследования параметров радиационной обстановки в части природного облучения населения проводятся на территории Российской Федерации многочисленными лабораториями радиационного контроля (ЛРК), аккредитованными на соответствующие виды исследований, поэтому система сбора информации об уровнях природного облучения населения является трехступенчатой: первичные измерительные и адресные данные за каждый отчетный год заносятся в программу непосредственно организациями, проводившими исследования; далее данные каждого региона аккумулируются в региональном банке данных по дозам облучения граждан Российской Федерации за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона (РБДОПИ), установленном в ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии» субъекта Российской Федерации, на их основе выполняется оценка доз облучения населения региона за отчетный год; за-

тем информация от всех РБДОПИ поступает в ФБДОПИ, установленный в ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, где проводится анализ данных по Российской Федерации в целом. Соответствующее программное обеспечение для каждого уровня сбора информации по природному облучению населения разработано специалистами ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, на сайте института в свободном доступе размещены дистрибутивы программ для использования ЛРК (ФФ-4) и РБДОПИ (РБД-Ф4), а также методические рекомендации МР 2.6.1.0088-14⁴.

Надо отметить, что в первые годы создания системы сбора информации о природном облучении населения России коммуникации еще не достигли современного уровня, и далеко не все организации имели электронные адреса; обеспечение пользователей программными средствами и методически-инструктивными документами производилось специалистами ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева путем отправки дисков с дистрибутивами программ и документами в каждый регион бандеролями Почтой России.

Использование программного обеспечения для ведения РБДОПИ позволяет автоматически формировать ежегодную форму федерального статистического наблюдения № 4-ДОЗ «Сведения о дозах облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона» для каждого субъекта Российской Федерации. Однако, к сожалению, функционирование РБДОПИ в отдельных регионах вызывает сложности в связи с нехваткой или загруженностью специалистов: к 2020 г. в 4 субъектах Российской Федерации (Республика Дагестан, Чеченская Республика, Республика Крым, город Севастополь) РБДОПИ не ведется и форма № 4-ДОЗ представляется только на бумажном носителе.

В таблице 1 приведены данные, характеризующие динамику внедрения государственной системы контро-

Таблица 1
Динамика представления данных по форме федерального статистического наблюдения № 4-ДОЗ в период 2001–2020 гг.
[Table 1]

Отчетный год [Year]	Сформирован региональный банк данных [Data in regional databank]		Представлено форм № 4-ДОЗ в целом [Submitted forms in general]	
	Число форм СФ [Number of forms from regions]	% от общего числа СФ [% from the total forms]	Число форм СФ [Number of forms from regions]	% от общего числа СФ [% from the total forms]
2001	14	15,73	75	84,2
2002	28	31,46	79	88,8
2003	43	48,31	79	88,8
2004	43	48,31	79	88,8
2005	56	62,92	86	96,6

⁴ 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. [Federal statistical surveillance Form #4-DOZ. Data on the doses of the public from natural and man-made adjusted background. Methodical recommendations MR 2.6.1.0088-14(In Russ.)]

Окончание табл. 1

Отчетный год [Year]	Сформирован региональный банк данных [Data in regional databank]		Представлено форм № 4-ДОЗ в целом [Submitted forms in general]	
	Число форм СФ [Number of forms from regions]	% от общего числа СФ [% from the total forms]	Число форм СФ [Number of forms from regions]	% от общего числа СФ [% from the total forms]
2006	45	51,14	77	87,5
2007	55	65,48	81	96,4
2008	73	87,95	82	98,8
2009	77	92,77	82	98,8
2010	77	92,77	82	98,8
2011	78	93,98	82	98,8
2012	78	93,98	82	98,8
2013	77	92,77	82	98,8
2014	79	92,94	82	96,5
2015	80	94,12	85	100
2016	80	94,12	85	100
2017	81	95,29	85	100
2018	81	95,29	85	100
2019	81	95,29	85	100
2020	81	95,29	85	100

ля и учета доз облучения населения ПИИИ в субъектах Российской Федерации в 2001–2020 гг. Поскольку за последние 20 лет общее число субъектов Российской Федерации неоднократно изменялось в результате объединения субъектов или образования новых (в период с 2001 по 2012 г. уменьшилось с 89 до 83, а в 2014 г. вследствие вхождения в состав Российской Федерации Республики Крым и города Севастополь возросло до 85), для иллюстрации динамики в таблице 1 приведены также процентные показатели представленных форм № 4-ДОЗ к общему числу регионов России в конкретный период.

Виды и объемы исследований

В соответствии с Положением о ФБДОПИ, утвержденным Приказом Минздрава Российской Федерации от 21.06.2003 г. № 268⁵, «в рамках ФБДОПИ контролируются и учитываются следующие виды облучения граждан Российской Федерации:

– внешнее гамма-облучение граждан в жилых и общественных зданиях и на открытой местности на территории населенных пунктов;

– внутреннее облучение граждан изотопами радона и их короткоживущими дочерними продуктами в жилых и общественных зданиях;

– внутреннее облучение граждан за счет природных радионуклидов в продуктах питания и питьевой воде;

– внутреннее облучение граждан за счет ингаляционного поступления долгоживущих природных радионуклидов в атмосферном воздухе на территории населенных пунктов;

– внешнее облучение за счет космического излучения на поверхности земли и внутреннее облучение за счет ⁴⁰K (не контролируются, но учитываются при оценке суммарных эффективных доз облучения граждан)».

После вступления в действие новой редакции формы федерального статистического наблюдения № 4-ДОЗ, утвержденной Приказом Росстата от 16.10.2013 № 411⁶, в ФБДОПИ была предусмотрена также возможность контроля и учета данных о дозах природного облучения работников в производственных условиях.

За 20 лет функционирования и ежегодного пополнения ФБДОПИ был собран уникальный массив данных о

⁵ Приказ Минздрава Российской Федерации от 21 июня 2003 г. № 268 «Об утверждении положений о федеральных банках данных» [Order of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation #268, 21.06.2003, "On the establishment of the provisions on the federal databanks" (In Russ.)]

⁶ Приказ Росстата от 16.10.2013 г. № 411 «Об утверждении статистического инструментария для организации Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека федерального статистического наблюдения за санитарным состоянием территорий, профессиональными заболеваниями (отравлениями), дозами облучения» [Order of the Rosstat No 411, 16.10.2013, "On the establishment of the statistical toolset for the organization of the federal statistical surveillance on the sanitary condition of the territories, professional diseases (poisonings), doses from ionizing exposure by the Federal Service on surveillance of consumer rights protection and human well-being" (In Russ.)]

параметрах радиационной обстановки в части природного облучения населения Российской Федерации. В таблице 2 представлена хранящаяся в ФБДОПИ информация о ежегодном количестве ЛРК, проводивших в отчетном году измерения параметров радиационной обстановки в части ПИИИ в регионах страны, количестве населенных пунктов (НП), на территории которых проводилось обследование, и количестве обследованных в каждом году (с 2001 по 2020 г.) зданий жилого и общественного назначения с учетом их типа (Д – деревянные здания, 1К – малоэтажные каменные, МК – многоэтажные каменные).

Число НП на территории Российской Федерации, в которых проводились измерения факторов природного облучения населения, стабильно увеличивалось в период с 2001 по 2009 г. (за исключением 2006 г.) – с 169 до 6248 (более чем в 35 раз); затем последовало снижение охвата НП обследованиями в части ПИИИ, и в период 2012–2020 гг. ежегодное число обследованных НП вышло на уровень 3,5–4 тысяч. Аналогичная тенденция характерна для количества обследованных жилых и общественных зданий: после заметного роста с 2001 по 2014–2017 г. (для разных типов зданий ситуация несколько отличается) число ежегодно обследованных деревянных и малоэтажных каменных зданий установилось на значении около

2 тысяч, многоэтажных – на значении около 5,5 тысяч зданий в год.

В таблицах 3 и 4 приведены данные о количестве измерений мощности дозы гамма-излучения (МАД) и измерений уровней содержания радона (объемной активности (ОА) радона и эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) изотопов радона) в жилых и общественных зданиях различных типов, а также о количестве измерений МАД на открытой местности.

Таким образом, за 20 лет функционирования ФБДОПИ исходными данными для оценки доз внешнего облучения населения Российской Федерации являются результаты 2 134 975 измерений МАД в жилых и общественных зданиях и 3 176 107 измерений МАД на открытой местности; для оценки доз внутреннего облучения за счет ингаляции радона – результаты 648 360 измерений ОА радона и ЭРОА изотопов радона.

В таблицах 5 и 6 представлены данные о количестве измерений удельной активности (УА) природных радионуклидов (ПРН) в питьевой воде и пищевых продуктах, которые собираются в ФБДОПИ с 2007 г. Всего в ФБДОПИ содержатся результаты 188 781 измерений УА ПРН в питьевой воде (более 70 % из которых составляют измерения УА радона) и результаты 134 762 измерений УА ПРН в пищевых продуктах.

Данные ФБДОПИ о количестве ЛРК, количестве НП, количестве зданий в каждом отчетном году в период 2001–2020 гг.
[Table 2]

Data from FBDOPI on the number of measuring laboratories, number of settlements and number of buildings for each year in 2001–2020]

Отчетный год [Year]	Число ЛРК [Number of measuring laboratories]	Число НП [Number of settlements]	Число зданий [Number of buildings]		
			Д [houses]	1К [One storey buildings]	МК [Multistorey buildings]
2001	12	169	92	135	822
2002	40	819	790	630	2 286
2003	102	1 177	1 248	3 113	3 972
2004	96	1 083	685	3 419	4 043
2005	100	1 245	1 455	4 292	4 109
2006	26	621	758	674	962
2007	188	2 905	2 332	3 537	4 063
2008	336	5 221	3 460	3 498	5 577
2009	442	6 248	3 288	3 230	5 454
2010	447	5 928	3 488	3 495	5 691
2011	426	5 604	3 640	3 419	7 363
2012	438	4 153	3 094	3 335	7 074
2013	448	3 557	3 364	3 608	7 006
2014	442	3 681	3 463	3 215	7 040
2015	439	3 877	2 739	3 386	7 213
2016	412	3 747	3 023	3 257	7 441
2017	409	3 917	2 381	2 831	7 870
2018	400	3 830	2 380	2 881	6 740
2019	355	3 490	2 561	2 923	6 407
2020	320	3 694	1 911	2 089	5 330

Таблица 3

Данные ФБДОПИ о количестве измерений МАД в зданиях и на открытой местности в каждом отчетном году в период 2001–2020 гг.

[Table 3]

Data from FBDOPI on the number of measurements of the ambient equivalent dose rate in buildings and outdoors for each year in 2001–2020]

Отчетный год [Year]	Число измерений МАД в зданиях [Number of ADER measurements in buildings]			Число измерений МАД на ОМ [Number of ADER measurements outdoors]
	Д [houses]	1К [One storey buildings]	МК [Multistorey buildings]	
2001	139	255	4 127	815
2002	935	873	12 291	4 569
2003	1 509	4 163	32 064	13 937
2004	822	3 961	38 376	12 559
2005	1 735	4 882	43 750	18 330
2006	863	779	7 627	2 938
2007	4 912	8 216	94 501	111 333
2008	12 404	9 481	123 715	351 256
2009	12 006	9 935	114 948	337 756
2010	13 446	9 830	122 657	325 159
2011	6 751	8 741	155 108	266 924
2012	7 552	10 036	161 989	201 942
2013	8 711	10 548	134 948	232 407
2014	12 103	12 024	154 285	265 242
2015	8 239	12 382	133 778	192 446
2016	8 146	11 781	106 934	180 990
2017	8 171	11 499	115 197	171 613
2018	8 099	11 872	102 394	171 641
2019	9 178	11 132	100 912	186 874
2020	5 049	7 394	84 820	127 376
2001–2020	130 770	159 784	1 844 421	3 176 107

Таблица 4

Данные ФБДОПИ о количестве измерений ОА радона и ЭРОА изотопов радона в зданиях в каждом отчетном году в период 2001–2020 гг.

[Table 4]

Data from FBDOPI on the number of measurements of the radon volume activity and equivalent equilibrium volume activity (EEVA) in buildings for each year in 2001–2020]

Отчетный год [Year]	Число измерений ЭРОА изотопов радона в зданиях [Number of measurements of EEVA of the radon isotopes in buildings]		
	Д [houses]	1К [One storey buildings]	МК [Multistorey buildings]
2001	117	172	2 343
2002	422	462	6 276
2003	669	1 728	10 861
2004	85	902	12 368
2005	770	1 775	17 949
2006	224	319	1 681
2007	1 382	2 481	21 854
2008	2 189	2 885	32 210
2009	1 816	1 983	29 789
2010	2 190	1 961	33 901
2011	2 550	2 459	41 587

Окончание таблицы 4

Отчетный год [Year]	Число измерений ЭРОА изотопов радона в зданиях [Number of measurements of EEVA of the radon isotopes in buildings]		
	Д [houses]	1К [One storey buildings]	МК [Multistorey buildings]
2012	1 879	2 935	47 884
2013	2 732	3 340	36 970
2014	2 980	3 344	50 546
2015	3 001	3 451	44 371
2016	3 367	3 849	35 654
2017	3 825	4 186	44 854
2018	3 137	3 735	32 036
2019	2 972	3 358	31 726
2020	2 040	2 243	27 585
2001-2020	38 347	47 568	562 445

Таблица 5

Данные ФБДОПИ о количестве измерений УА ПРН в питьевой воде в каждом отчетном году в период 2001–2020 гг.

[Table 5]

Data from FBDOPi on the number of measurements of the volume activity of naturally occurring radionuclides in drinking water for each year in 2001–2020]

Отчетный Год [year]	Число измерений УА ПРН в питьевой воде [Number of measurements of the volume activity of naturally occurring radionuclides in drinking water]					
	Ra-226	Ra-228	Pb-210	Po-210	U-234	Rn-222
2007	447	381	465	513	322	2 538
2008	614	452	566	648	388	5 198
2009	855	676	744	826	523	5 996
2010	790	681	737	819	579	6 224
2011	775	657	659	751	550	7 713
2012	995	854	862	932	759	9 265
2013	886	769	793	866	681	10 292
2014	858	795	802	907	699	11 154
2015	1 150	798	805	877	704	10 660
2016	916	836	836	942	687	12 004
2017	1 075	976	904	1 062	763	12 390
2018	830	737	742	910	613	12 366
2019	918	846	855	944	709	15 115
2020	998	944	932	1 010	824	13 847
2001–2020	12 107	10 402	10 702	12 007	8 801	134 762

Таблица 6

Данные ФБДОПИ о количестве измерений УА ПРН в пищевых продуктах в каждом отчетном году в период 2001–2020 гг.

[Table 6]

Data from FBDOPi on the number of measurements of the activity concentration of naturally occurring radionuclides in food products for each year in 2001–2020]

Отчетный год [year]	Число измерений УА ПРН в пищевых продуктах [Number of measurements of the activity concentration of naturally occurring radionuclides in food products]				
	Ra-226	Ra-228	Pb-210	Po-210	U-234+ U-238
2007	152	54	54	56	55
2008	118	18	93	18	17
2009	426	242	432	305	306
2010	250	212	388	253	250

Отчетный год [year]	Число измерений УА ПРН в пищевых продуктах [Number of measurements of the activity concentration of naturally occurring radionuclides in food products]				
	Ra-226	Ra-228	Pb-210	Po-210	U-234+ U-238
2011	271	200	314	250	304
2012	219	181	325	220	219
2013	214	172	276	210	210
2014	238	200	303	238	238
2015	226	189	274	226	226
2016	214	176	289	214	214
2017	193	158	259	193	193
2018	21	21	78	21	21
2019	–	–	50	–	–
2020	180	180	180	180	180
2001–2020	2 542	1 823	3 135	2 204	2 253

Результаты функционирования ФБДОПИ

Основным итогом 20-летнего функционирования ФБДОПИ стал уникальный, ежегодно пополняемый массив информации, который является крупнейшей в России базой первичных измерительных и адресных данных об уровнях воздействия ПИИИ и служит основой для наиболее объективных оценок доз природного облучения населения Российской Федерации.

Конечно, учитывая размеры нашей страны, на территории России еще есть «белые пятна» в части обследования уровней облучения населения ПИИИ; к примеру, данные о высоких уровнях содержания радона в жилых домах и питьевой воде ряда населенных пунктов восточных районов Оренбургской области были впервые получены только в 2018–2019 гг. [1]. Тем не менее, собранные за 20 лет в ФБДОПИ данные наиболее полно отражают картину

природного облучения населения субъектов Российской Федерации и страны в целом.

Ежегодно в рамках заполнения формы № 4-ДОЗ проводится оценка средних доз облучения населения отдельных регионов Российской Федерации и оценка средней индивидуальной годовой эффективной дозы облучения за счет ПИИИ на одного жителя России за конкретный год. Эти оценки доз выполняются по данным измерений каждого отчетного года и могут для каждого субъекта Российской Федерации и для страны в целом отличаться от аналогичных данных других лет, поскольку измерениями параметров радиационной обстановки в части ПИИИ в разные годы могут быть охвачены населенные пункты с разным уровнем природного облучения населения. В таблице 7 приведены данные о средней по Российской Федерации дозе природного облучения за каждый год с

Таблица 7

Средние индивидуальные годовые эффективные дозы облучения населения Российской Федерации ПИИИ за каждый год с 2001 по 2020 г.

[Table 7]

Mean individual annual effective doses of the public of the Russian Federation from the natural sources of ionizing radiation (NSIR) for each year in 2001–2020]

Отчетный год [Year]	Средняя индивидуальная годовая эффективная доза жителя России, мЗв/год [Mean individual annual effective dose per capita, mSv/year]						
	K-40	ПРН в атмосферном воздухе [NSIR in atmospheric air]	Космическая компонента [Cosmic component]	Внешнее терригенное облучение [External terrigenic exposure]	Радон [Radon]	Пищевые продукты + питьевая вода [Food products + drinking water]	Полная (суммарная) доза за счет ПИИИ [Total dose form NSIR]
2001	0,17	0,006	0,339	0,89	2,42	0,40	4,23
2002	0,17	0,006	0,339	0,90	2,30	0,33	4,05
2003	0,17	0,006	0,339	0,92	2,17	0,12	3,73
2004	0,17	0,006	0,339	0,87	2,06	0,19	3,64
2005	0,17	0,006	0,339	0,91	1,99	0,15	3,57
2006	0,17	0,006	0,339	0,62	2,12	0,15	3,41

Отчетный год [Year]	Средняя индивидуальная годовая эффективная доза жителя России, мЗв/год [Mean individual annual effective dose per capita, mSv/year]						
	K-40	ПРН в ат- мосферном воздухе [NSIR in atmospheric air]	Космическая компонента [Cosmic component]	Внешнее терригенное облучение [External terrigenic exposure]	Радон [Radon]	Пищевые продукты + питьевая вода [Food products + drinking water]	Полная (суммарная) доза за счет ПИИИ [Total dose form NSIR]
2007	0,17	0,006	0,339	0,74	1,87	0,19	3,32
2008	0,17	0,006	0,339	0,68	1,83	0,21	3,24
2009	0,17	0,006	0,339	0,69	1,77	0,21	3,19
2010	0,17	0,006	0,339	0,68	1,61	0,24	3,05
2011	0,17	0,006	0,339	0,71	1,86	0,21	3,30
2012	0,17	0,006	0,339	0,68	1,89	0,20	3,29
2013	0,17	0,006	0,339	0,70	2,03	0,16	3,41
2014	0,17	0,006	0,339	0,69	2,05	0,17	3,43
2015	0,17	0,006	0,339	0,68	2,02	0,16	3,38
2016	0,17	0,006	0,339	0,67	2,05	0,17	3,41
2017	0,17	0,006	0,339	0,69	1,97	0,17	3,35
2018	0,17	0,006	0,339	0,68	2,05	0,17	3,42
2019	0,17	0,006	0,339	0,69	2,07	0,16	3,44
2020	0,17	0,006	0,339	0,69	1,81	0,15	3,17

2001 по 2020 г., рассчитанные с учетом только данных, полученных в отчетном году. При ее расчете были учтены как данные ФБДОПИ, так и данные, поступавшие на бумажном носителе от регионов, в которых не сформированы РБДОПИ.

Как можно заметить, из всех компонентов дозы природного облучения наибольшая вариабельность характерна для дозы внутреннего облучения за счет ингаляции изотопов радона, вносящей основной вклад в суммарную дозу облучения населения Российской Федерации за счет ПИИИ.

Уровни воздействия ПИИИ на конкретной территории определяются ее географическими, климатическими, геологическими и геофизическими характеристиками; соответственно, показатели природного облучения людей, проживающих на одной и той же местности, достаточно стабильны. Именно поэтому наиболее объективными оценками средних индивидуальных годовых эффективных доз природного облучения населения регионов и России в целом являются оценки, выполненные на основе всех имеющихся данных измерений показателей ПИИИ в течение всего времени исследований (а не только одного года). Ежегодно с очередным поступлением в ФБДОПИ информации о параметрах природного облучения населения эти оценки уточняются с учетом новых данных.

В информационных сборниках «Дозы облучения населения Российской Федерации» [2–19] публикуются дан-

ные о дозах природного облучения населения регионов, рассчитанные на основе данных измерений с 2001 г. по текущий год.

Средняя индивидуальная годовая эффективная доза облучения за счет ПИИИ на одного жителя России, оцененная по данным измерений, выполненных за весь период функционирования ФБДОПИ (с 2001 по 2020 г.), составляет 3,36 мЗв/год, значения дозообразующих компонент приведены в таблице 8, вклад каждой компоненты в суммарную дозу – на рисунке.

Важнейшим результатом сбора, систематизации и анализа измерительных данных об уровнях ПИИИ в регионах и выполненных на их основе оценок доз природного облучения населения субъектов Российской Федерации стало внесение изменений в российское санитарное законодательство в части трактовки степени радиационной безопасности населения при облучении ПИИИ. В ОСПОРБ-99⁷ (п. 7.2.2) были приняты следующие критерии оценки средних индивидуальных годовых эффективных доз природного облучения жителей страны: дозы, не превышающие 2 мЗв/год, – приемлемое природное облучение; дозы в интервале от 2 до 5 мЗв/год – повышенное природное облучение, дозы свыше 5 мЗв/год – высокое природное облучение. Однако уже в первое десятилетие функционирования ФБДОПИ выполненные оценки доз населения за счет ПИИИ показали, что принятые в ОСПОРБ-99 дозовые критерии не отражают реаль-

⁷ СП 2.6.1.799-99. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности. ОСПОРБ-99 (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ от 27.12.1999) [SP 2.6.1.799-99 Basic sanitary rules of the provision of the radiation safety. OSPORB-99 (In Russ.)]

Таблица 8

Структура средней индивидуальной годовой эффективной дозы облучения населения Российской Федерации ПИИИ
(по данным измерений в 2001–2020 гг.)

[Table 8]

Structure of the mean individual annual effective dose of the public of the Russian Federation from the natural sources of ionizing radiation (NSIR) based on measurements in 2001–2020]

Период [Period]	Средняя индивидуальная годовая эффективная доза жителя России, мЗв/год [Mean individual annual effective dose per capita, mSv/year]						Полная (суммарная) доза за счет ПИИИ [Total dose form NSIR]
	K-40	ПРН в ат- мосферном воздухе [NSIR in atmo- spheric air]	Космическая компонента [Cosmic component]	Внешнее терригенное облучение [External terrigenic exposure]	Радон [Radon]	Пищевые продукты + питьевая вода [Food products + drinking water]	
2001–2020	0,17	0,006	0,339	0,68	1,99	0,17	3,36

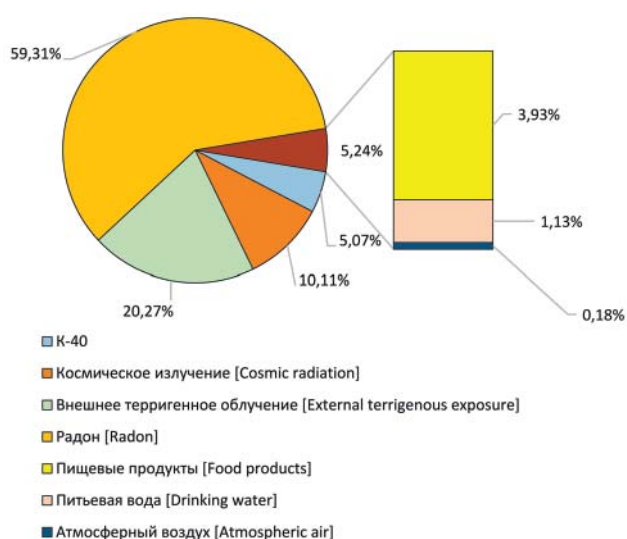


Рис. Вклад отдельных ПИИИ в среднюю индивидуальную годовую эффективную дозу облучения населения Российской Федерации

[Fig. Contribution of different natural sources of ionizing radiation to the mean individual effective dose of the public of the Russian Federation]

ной картины природного облучения населения России. На основании массива данных, собранных к 2010 г., в санитарных правилах ОСПОРБ 99/2010⁸ и СанПиН 2.6.1.2800-10⁹ были введены уточненные критерии оценки доз природного облучения, в 2–2,5 раза превышающие принятые ранее: менее 5 мЗв/год – приемлемый уровень облучения, от 5 до 10 мЗв/год – повышенный, свыше 10 мЗв/год – высокий.

Ежегодный сбор и анализ измерительной и адресной информации о параметрах природного облучения населения позволил сформировать массив данных о выявленных в различных регионах страны группах жителей с повышенными и высокими уровнями облучения за счет ПИИИ; во всех случаях причиной неприемлемого уровня природного облучения отдельных групп населения является высокое содержание радона, торона и их короткоживущих дочерних продуктов распада (ДПР) в воздухе жилых помещений. Подробные данные о группах населения с высокими дозами облучения за счет изотопов радона, выявленных в период с 2001 по 2015 г. на территории 19 субъектов Российской Федерации (Республика Алтай, Еврейская АО, Забайкальский край, Челябинская область и др.), приведены в [20]. С 2016 по 2020 г. были дополнительно получены сведения о высоких уровнях природного облучения (также обусловленных радоном) жителей ряда населенных пунктов восточных районов Оренбургской области, Алданского района Республики Саха (Якутия) и г. Гусиноозерска Селенгинского района Республики Бурятия. Собранные данные служат основой для поиска решений проблем в области обеспечения радиационной безопасности, одной из которых, согласно «Основам государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу»¹⁰, является «наличие в Российской Федерации групп населения с повышенным и высоким уровнями радиоактивного облучения вследствие воздействия природных радионуклидов».

Многообразие климатических и геофизических характеристик территории нашей страны, состоящей из

⁸ СП 2.6.1.2612-10 Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010) (утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 26 апреля 2010 г. № 40) [SP 2.6.1.2612-10 Basic sanitary rules of the provision of the radiation safety. OSPORB-99/2010 (In Russ.)]

⁹ СанПиН 2.6.1.2800-10 «Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения» (утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 24 декабря 2010 г. № 171) [SanPiN 2.6.1.2800-10 "Hygienic requirements on the limitation of the public exposure by the natural sources of ionizing exposure" (In Russ.)]

¹⁰ Указ Президента РФ от 13 октября 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» [Decree of the President of the Russian Federation No 585, 13.10.2018, "On the establishment of the Principles of the governmental policy in the field of the provision of the nuclear and radiation safety of the Russian Federation up to 2025 and for the later perspective" (In Russ.)]

85 (на 2020 г.) субъектов Российской Федерации, не могло не привести к значительным различиям в оценках доз облучения за счет ПИИИ жителей разных регионов. По данным исследований 2001–2020 гг., к территориям с низкими средними годовыми эффективными дозами природного облучения населения относятся Камчатский край (2,10 мЗв/год), Ненецкий АО (2,12 мЗв/год) и Астраханская область (2,12 мЗв/год); регионы, где средняя на 1 жителя доза облучения за счет ПИИИ близка к среднероссийскому показателю (3,36 мЗв/год): Нижегородская (3,27 мЗв/год), Липецкая (3,29 мЗв/год), Белгородская (3,43 мЗв/год) области и Республика Калмыкия (3,43 мЗв/год); в 6 субъектах Российской Федерации значение средней годовой эффективной дозы природного облучения, оцененное по всему 20-летнему массиву данных, находится в интервале от 5 до 10 мЗв/год (табл. 9).

Наибольшую в стране дозу природного облучения в среднем на 1 жителя получает население Республики Алтай; повышенные средние дозы природного облучения населения 6 субъектов Российской Федерации обусловлены высокими уровнями содержания радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий этих регионов.

Проблемы и перспективы развития ФБДОПИ

За 20 лет внедрения и функционирования ФБДОПИ периодически возникали проблемы, связанные с недостаточной отлаженностью программного обеспечения, низкой подготовленностью персонала, структурными ошибками при введении информации; специалисты ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева (администратор ФБДОПИ, специалисты информационно-аналитического центра, сотрудники учебного отдела) совместными усилиями в рамках своей компетенции ежегодно обеспечивали формирование ФБДОПИ на максимально высоком уровне.

Однако в последние годы основные сложности работы с ФБДОПИ возникают при сборе первичной информации от аккредитованных ЛРК.

На первых этапах функционирования системы ЕСКИД основной объем измерений параметров радиационной обстановки в части облучения ПИИИ проводился территориальными лабораториями службы санитарно-эпидемиологического надзора, и формирование региональных (и соответственно, федерального) банков данных доз облучения практически целиком зависело от результатов их деятельности. Реорганизация в 2005 г. службы

Субъекты Российской Федерации с повышенными уровнями природного облучения

Таблица 9

[Table 9]

Regions of the Russian Federation with the increased levels of natural exposure]

Субъект РФ [Region]	Средняя доза за счет ПИИИ, мЗв/год [Average dose from natural sources of ionizing radiation, mSv/year]
Республика Алтай [Altay Republic]	8,60
Республика Тыва [Tyva Republic]	5,63
Ставропольский край [Stavropol region]	5,70
Иркутская область [Irkutsk region]	5,23
Забайкальский край [Zabaykalskiy Territory]	7,81
Еврейская автономная область [Jewish Autonomous Region]	6,33

¹¹ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13 января 2005 г. № 23-р «О реорганизации в форме слияния 2218 федеральных государственных учреждений – центров государственного санитарно-эпидемиологического надзора, находящихся в ведении Минздрава России и МПС России, и образовании на базе реорганизуемых учреждений – 90 федеральных государственных учреждений – центров гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора» [Enactment of the Government of the Russian Federation 23-r “On reorganization in the form of merge of 2218 federal state facilities – centers of state sanitary-epidemiological surveillance headed by the Ministry of Healthcare of Russia and MPS of Russia and establishment on the base of reorganized facilities – 90 federal state facilities – centers of hygiene and epidemiology of Rospotrebnadzor” (In Russ.)]

¹² Приказ Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека от 18 января 2005 г. № 5 «О проведении реорганизации центров госсанэпиднадзора» [Order of Federal Service on surveillance of consumer rights protection and human well-being No 5 “On the conduction of the reorganization of the centers of Gossanepidnadzor” (In Russ.)]

¹³ Указ Президента Российской Федерации от 24 января 2011 г. № 86 «О единой национальной системе аккредитации» [Decree of the President of the Russian Federation No 86 “On the joint national system of accreditation” (In Russ.)]

Госсанэпиднадзора в соответствии с Распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 января 2005 г. № 23-р¹¹ и Приказом Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека от 18 января 2005 г. № 5¹² привела к временному снижению охвата НП и объемов измерений в 2006 г., отраженному в таблицах 2–4.

С созданием в 2011 г. в соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 24 января 2011 г. № 86¹³ системы Росаккредитации исследованиями показателей природного облучения населения на территории страны занимается также большое количество аккредитованных на соответствующие виды измерений ЛРК различных форм собственности, не имеющих ведомственной принадлежности к Роспотребнадзору.

Порядок функционирования ФБДОПИ, установленный в разделе V Положения о единой государственной системе контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан Приказом Минздрава Российской Федерации от 31.07.00 г. № 298¹⁴, гласит: «Ежегодно в установленные сроки центры госсанэпиднадзора (далее – ЦГСЭН) в субъектах Российской Федерации получают в установленном порядке от организаций, имеющих лаборатории радиационного контроля (далее – ЛРК), информацию о результатах исследований на содержание естественных радионуклидов в объектах окружающей среды за отчетный год». В настоящее время функции ЦГСЭН по сбору данных от отдельных ЛРК возложены на ФБУЗ «Центры гигиены и эпидемиологии» в субъектах Российской Федерации; порядок и сроки предоставления информации приведены в Форме Федерального статистического наблюдения № 4-ДОЗ «Сведения о дозах облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона», утвержденной Приказом Федеральной службы государственной статистики от 16 октября 2013 г.¹⁵: «Юридические лица, имеющие лаборатории радиационного контроля, не позднее 1 апреля года, следующего за отчетным годом, предоставляют данные ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии» в субъекте Российской Федерации».

Однако, вопреки установленным вышеуказанными документами правилам, руководители ряда ЛРК, созданных на коммерческой основе, не считают необходимым предоставление информации о проведенных ЛРК измерениях в ФБУЗ ЦГиЭ субъекта Российской Федерации. Например, при сборе данных о параметрах природного облучения по Санкт-Петербургу за 2020 г. только около 70% коммерческих ЛРК, проводящих измерения уровней ПИИИ на территории города, сформировали файл передачи данных для РБДОПИ, несмотря на то, что все организации были

проинформированы официальными письмами ФБУЗ ЦГиЭ по городу Санкт-Петербургу о порядке и сроках сбора данных для формирования РБДОПИ. Аналогичные ситуации в последние годы наблюдались и в других регионах страны; возможно, именно этим объясняется снижение в период 2018–2020 гг. количества выполненных исследований, сведения о которых заносятся в ФБДОПИ.

К сожалению, в настоящее время ответственность ЛРК за непредставление данных в РБДОПИ не предусмотрена, у специалистов ФБУЗ ЦГиЭ, в чьи обязанности входит формирование РБДОПИ субъекта Российской Федерации за отчетный год, в правовом поле нет инструментов воздействия на подобные лаборатории; в итоге возрастает риск потери полноты информации в ФБДОПИ и искажения в оценках доз природного облучения населения.

Перспективным направлением в работе ФБДОПИ на сегодняшний день является сбор и анализ данных о дозах производственного природного облучения работников предприятий неядерных отраслей промышленности; поскольку сбор таких данных в ФБДОПИ проводится только с 2013 г., охват предприятий и объем представленной в ФБДОПИ измерительной информации в масштабах страны к настоящему времени значительно проигрывает по сравнению с собранным массивом данных об уровнях природного облучения населения.

Заключение

Функционирующая в течение 20 лет в рамках ЕСКИД система сбора, передачи и обработки информации по уровням облучения населения Российской Федерации за счет ПИИИ, неотъемлемой частью которой являются региональные и Федеральный банки данных доз природного облучения, позволила создать инструмент долговременного автоматизированного учета измерительных и адресных данных о параметрах радиационной обстановки в части облучения ПИИИ по всей территории России; собранный массив данных стал основой для наиболее объективных оценок доз природного облучения населения как отдельных субъектов Российской Федерации, так и страны в целом. Нельзя не отметить ведущую роль специалистов Роспотребнадзора – сотрудников ФБУЗ «Центры гигиены и эпидемиологии» в субъектах Российской Федерации, Управлений Роспотребнадзора по субъектам Российской Федерации и ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, чей профессионализм, научный потенциал, опыт и ответственное отношение к делу являются основой для функционирования и совершенствования системы ЕСКИД и обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации при воздействии ПИИИ.

¹⁴ Приказ Минздрава Российской Федерации от 31 июля 2000 г. № 298 «Об утверждении Положения о единой государственной системе контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан» [Order of the Ministry of healthcare of the Russian Federation No 298 "On the establishment of the Provision on the joint state system of the control and accounting of the individual doses of citizens" (In Russ.)]

¹⁵ Приказ Федеральной службы государственной статистики от 16 октября 2013 г. № 411 «Об утверждении статистического инструментария для организации Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека федерального статистического наблюдения за санитарным состоянием территорий, профессиональными заболеваниями (отравлениями), дозами облучения». [Order of the Rosstat No 411, 16.10.2013, "On the establishment of the statistical toolset for the organization of the federal statistical surveillance on the sanitary condition of the territories, professional diseases (poisonings), doses from ionizing exposure by the Federal Service on surveillance of consumer rights protection and human well-being" (In Russ.)]

Литература

1. Кормановская Т.А., Романович И.К., Сапрыкин К.А., и др. Обеспечение радиационной безопасности населения восточных районов Оренбургской области при использовании питьевой воды из подземных источников водоснабжения // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 87-97.
2. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Брук Г.Я., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2002 году: справочник. СПб., 2004. 61 с.
3. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Брук Г.Я., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2003 году: справочник. СПб., 2004. 71 с.
4. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Кормановская Т.А., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2004 году: справочник. СПб., 2006. 61 с.
5. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Горский А.А., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2005 году: справочник. СПб., 2006. 60 с.
6. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Голиков В.Ю., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2006 году: справочник. СПб., 2007. 60 с.
7. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Кормановская Т.А., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2007 году: информационный сборник. СПб., 2008. 66 с.
8. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Кормановская Т.А., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2008 году: информационный сборник. СПб., 2009. 69 с.
9. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Братилова А.А., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2015 году: информационный сборник. СПб., 2016. 72 с.
10. Барышков Н.К., Кормановская Т.А., Кувшинников С.И., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2009 году: информационный сборник. СПб., 2010. 67 с.
11. Барышков Н.К., Братилова А.А., Кормановская Т.А., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2010 году: информационный сборник. СПб., 2011. 62 с.
12. Барышков Н.К., Братилова А.А., Кормановская Т.А., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2011 году: информационный сборник. СПб., 2012. 63 с.
13. Барышков Н.К., Братилова А.А., Кормановская Т.А., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2012 году: информационный сборник. СПб., 2013. 67 с.
14. Репин В.С., Барышков Н.К., Братилова А.А., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2013 году: информационный сборник. СПб., 2014. 60 с.
15. Репин В.С., Барышков Н.К., Братилова А.А., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации по итогам функционирования ЕСКИД в 2002–2015 гг.: информационный сборник. СПб., НИИРГ, 2015. 40 с.
16. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Братилова А.А., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2016 году: информационный сборник. СПб., 2017. 78 с.
17. Барковский А.Н., Руслан Р. Ахматдинов, Рустам Р. Ахматдинов, и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2017 году: информационный сборник. СПб., 2018. 72 с.
18. Барковский А.Н., Руслан Р. Ахматдинов, Рустам Р. Ахматдинов, и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2018 году: информационный сборник. СПб., 2019. 72 с.
19. Барковский А.Н., Руслан Р. Ахматдинов, Рустам Р. Ахматдинов, и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2019 году: информационный сборник. СПб., 2020. 70 с.
20. Романович И.К., Стamat И.П., Кормановская Т.А., и др. Природные источники ионизирующего излучения: дозы облучения, радиационные риски, профилактические мероприятия. Под редакцией академика РАН Г.Г. Онищенко и профессора А.Ю. Поповой. Санкт-Петербург, 2018. 431 с.

Поступила: 05.08.2021 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

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

Горский Григорий Анатольевич – кандидат медицинских наук, начальник отдела надзора за радиационной безопасностью Управления Роспотребнадзора по городу Санкт-Петербургу, доцент кафедры гигиены условий воспитания, обучения, труда и радиационной гигиены Северо-Западного государственного медицинского университета им. И.И. Мечникова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Кормановская Т.А., Ахматдинов Р.Р., Горский Г.А. Итоги 20 лет функционирования Федерального банка данных по дозам природного облучения населения Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 3. С. 112-125. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-112-125

Results of the 20-year period of functioning of the Federal Databank on the natural radiation doses to the population of the Russian Federation

Tatyana A. Kormanovskaya¹, Ruslan R. Akhmatdinov¹, Grigoriy A. Gorskiy^{2,3}

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 in Saint-Petersburg, Saint-Petersburg, Russia

³ North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov of the Ministry of Healthcare of the Russia, Saint-Petersburg, Russia

This study is focused on the analysis of the results of the functioning of the Federal Databank on the doses to the public of the Russian Federation from natural and man-made modified radiation background as a part of Joint governmental system of control and accounting of the doses from ionizing exposure in 2001–2020. The mean individual annual effective dose of the public of the Russian Federation from natural sources of ionizing exposure, calculated based on the data from all measurements in 2001–2020, is equal to 3,36 mSv/year. The study includes the analysis of the problems and perspectives of the improvement of the system of the data collection on the levels of exposure of the public of the Russian Federation from natural sources.

Key words: natural sources of ionizing exposure, individual effective doses from natural exposure, Joint governmental system of control and accounting of the doses from ionizing exposure, Federal Databank on the doses to the public of the Russian Federation from natural and man-made modified radiation background.

References

- Kormanovskaya TA, Romanovich IK, Saprykin KA, Vyaltina NE, Gaevoy SV, Konovalov VYu, et al. Provision of the radiation safety of the public of the eastern districts of the Orenburg region for the use of the drinking water from the underground water supply sources. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(3): 87–97. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2020-13-3-87-97>
- Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bruk GYa, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Lipatova OE, et al. Doses to the public of the Russian Federation in 2002: a bulletin. Saint-Petersburg; 2004. 61 p. (In Russian)
- Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bruk GYa, Gorskiy AA, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, et al. Doses to the public of the Russian Federation in 2003: a bulletin. Saint-Petersburg; 2004. 71 p. (In Russian)
- Barkovsky AN, Baryshkov NK, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Lipatova OE, Perminova GS, et al. Doses to the public of the Russian Federation in 2004: a bulletin. Saint-Petersburg; 2006. 61 p. (In Russian)
- Barkovsky AN, Baryshkov NK, Gorskiy AA, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Kuvshinnikov SI, et al. Doses to the public of the Russian Federation in 2005: a bulletin. Saint-Petersburg; 2006. 60 p. (In Russian)
- Barkovsky AN, Baryshkov NK, Golikov VYu, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Repin VS, et al. Doses to the public of the Russian Federation in 2006: a bulletin. Saint-Petersburg; 2007. 60 p. (In Russian)
- Barkovsky AN, Baryshkov NK, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Lipatova OV, Medvedev AYU, et al. Doses to the public of the Russian Federation in 2007: information bulletin. Saint-Petersburg; 2008. 66 p. (In Russian)
- Barkovsky AN, Baryshkov NK, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Lipatova OV, Medvedev AYU, et al. Doses to the public of the Russian Federation in 2008: information bulletin. Saint-Petersburg; 2009. 69 p. (In Russian)
- Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bratilova AA, Kormanovskaya TA, Repin LV, Romanovich IK, et al. Doses to the public of the Russian Federation in 2015: information bulletin. Saint-Petersburg; 2016. 72 p. (In Russian)
- Baryshkov NK, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Lipatova OV, Medvedev AYU, Perminova GS, et al. Doses to the public of the Russian Federation in 2009: information bulletin. Saint-Petersburg; 2010. 67 p. (In Russian)
- Baryshkov NK, Bratilova AA, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Lipatova OV, Matyukhin SV, et al. Doses to the public of the Russian Federation in 2010: information bulletin. Saint-Petersburg; 2011. 62 p. (In Russian)
- Baryshkov NK, Bratilova AA, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Lipatova OV, Matyukhin SV, et al. Doses to the public of the Russian Federation in 2011: information bulletin. Saint-Petersburg; 2012. 63 p. (In Russian)
- Baryshkov NK, Bratilova AA, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Lipatova OV, Matyukhin SV, et al. Doses to the public of the Russian Federation in 2012: information bulletin. Saint-Petersburg; 2013. 67 p. (In Russian)
- Repin VS, Baryshkov NK, Bratilova AA, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Matyukhin SV, et al. Doses to the public of the Russian Federation in 2013: information bulletin. Saint-Petersburg; 2014. 60 p. (In Russian)
- Repin VS, Baryshkov NK, Bratilova AA, Varfolomeeva KV, Goncharova YuN, Kononenko DV, et al. Doses to the public of the Russian Federation based on the results of the ESKID in 2002–2015: information bulletin. Saint-Petersburg: NIIRG; 2015. 40 p. (In Russian)

Tatyana A. Kormanovskaya

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

Address for correspondence: Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: f4dos@mail.ru

16. Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bratilova AA, Bruk GYa, Vorobyev BF, Kormanovskaya TA, et al. Doses to the public of the Russian Federation in 2016: information bulletin. Saint-Petersburg; 2017. 78 p. (In Russian)
17. Barkovsky AN, Ruslan R. Akhmatdinov, Rustam R. Akhmatdinov, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Doses to the public of the Russian Federation in 2017: information bulletin. Saint-Petersburg; 2018. 72 p. (In Russian)
18. Barkovsky AN, Ruslan R. Akhmatdinov, Rustam R. Akhmatdinov, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Doses to the public of the Russian Federation in 2018: information bulletin. Saint-Petersburg; 2019. 72 p. (In Russian)
19. Barkovsky AN, Ruslan R. Akhmatdinov, Rustam R. Akhmatdinov, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Doses to the public of the Russian Federation in 2019: information bulletin. Saint-Petersburg; 2020. 70 p. (In Russian)
20. Romanovich IK, Stamat IP, Kormanovskaya TA, Kononenko DV, et al. Natural sources of ionizing exposure: doses, radiation risks, prophylactic measures. Edited by academicians of RAS G.G. Onischenko and prof. A.Yu. Popova. Saint-Petersburg; 2018. 431 p. (In Russian)

Received: August 05, 2021

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)

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

Grigoriy A. Gorskiy – Head of the department of the surveillance on the radiation safety of the Directorate of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being in Saint-Petersburg, docent of the department of hygiene of the conditions of parenting, education, labor and radiation hygiene of the North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov of the Ministry of Healthcare of the Russia, Saint Petersburg, Russia

For citation: Kormanovskaya T.A., Akhmatdinov R.R., Gorskiy G.A. Results of the 20-year period of functioning of the Federal Databank on the natural radiation doses to the population of the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No. 3. P. 112-125. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-112-125

Оценка поглощенных доз в плоде при проведении компьютерной томографии органов грудной клетки беременной женщины

А.В. Водоватов^{1,2}, Л.А. Чипига^{1,3,4}, П.А. Пивень⁵, Г.Е. Труфанов⁴, Г.В. Беркович⁴, И.А. Машенко⁴,
П.С. Дружинина¹, В.Г. Пузырев², С.А. Рыжов^{6,7}

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 Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

³ Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова, Санкт-Петербург, Россия

⁵ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

⁶ Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий, Москва, Россия

⁷ Национальный медицинский исследовательский центр детской гематологии, онкологии и иммунологии имени Дмитрия Рогачева, Москва, Россия

В Российской Федерации, как и в остальных развитых странах мира, ежегодно растет число и доля высокодозовых методов лучевой диагностики, в частности, компьютерной томографии. Максимальный рост числа КТ-исследований в России наблюдался в 2020 г. за счет массированного применения данного метода для диагностики новой коронавирусной инфекции COVID-19. Его применение для исследования органов грудной клетки у беременных пациенток связано с рядом нерешенных вопросов. Общепринятым подходом по обеспечению радиационной защиты беременных пациенток является оценка поглощенной дозы в плоде после каждого рентгенодиагностического исследования. К сожалению, на текущий момент утвержденные методики оценки поглощенной дозы в плоде в отечественной практике отсутствуют. Целью данного исследования являлась оценка дозы облучения плода у беременных женщин, проходящих КТ-исследование органов грудной клетки в связи с диагностикой новой коронавирусной инфекции COVID-19, с целью оценки возможности развития пороговых эффектов у плода. Для этого были собраны параметры отечественных и зарубежных протоколов КТ-сканирования органов грудной клетки и оценены поглощенная доза в матке беременной женщины и эффективная доза у плода. Параметры зарубежных протоколов КТ-сканирования органов грудной клетки для беременных были определены посредством мета-анализа литературных источников; отечественных — путем сбора данных на базе КТ-отделений в медицинских организациях Санкт-Петербурга. На основании параметров протоколов КТ-сканирования органов грудной клетки был выполнен расчет поглощенной дозы в матке пациентки и эффективной дозы у плода с использованием компьютерной программы NCICT 3.0 для сроков беременности 8, 10, 15, 20, 25, 30, 35 и 38 недель. Результаты расчетов показывают, что поглощенные дозы в матке матери и эффективные дозы у плода достоверно не отличаются друг от друга для всех исследованных сроков беременности. Максимальные значения доз, определенные для обследованных протоколов сканирования, находятся примерно на уровне в 0,5 мГр (мЗв) для сроков 8–25 недель, 0,6 мГр (мЗв) для 30-й недели, 1,4 мГр (мЗв) для 35-й недели, и 2,7 мГр (мЗв) для 38-й недели. Результаты исследования показали, что порог развития детерминированных эффектов в плоде, принимаемый равным 100 мГр, практически не достигнут даже при проведении многократных (вплоть до 10–15 раз) КТ-сканирования органов грудной клетки. Таким образом, проведение КТ-сканирования органов грудной клетки в качестве метода выбора диагностики и стадирования COVID-19 для беременных женщин не будет связано с развитием детерминированных эффектов у плода.

Ключевые слова: компьютерная томография, поглощенные дозы в плоде, COVID-19, новая коронавирусная инфекция.

Водоватов Александр Валерьевич

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

Адрес для переписки: 197101, ул. Мира 8, Санкт-Петербург, Российская Федерация. E-mail: vodovattoff@gmail.com

Введение

Благодаря высокой информативности по сравнению с рентгенографией, компьютерная томография (КТ) становится незаменимым методом в ранней диагностике COVID-19. КТ позволяет предположить диагноз вирусной пневмонии, вызванной COVID-19, быстро оценить объем поражения легочной ткани и степень тяжести изменений, а также уточнить стадию изменений по характерным для новой коронавирусной пневмонии паттернам [1]. Основываясь на данных КТ, клинических и анамнестических данных, можно проводить быструю маршрутизацию пациентов и начинать противовирусную терапию [2–5].

Одной из проблем, обусловленной как значительным увеличением числа КТ-исследований, так и спецификой назначения КТ при коронавирусной инфекции, является назначение КТ органов грудной клетки для оценки объема поражения легочной ткани беременным пациенткам. Следует отметить, что общепринятым подходом как в отечественной, так и в зарубежной практике [6–9] является минимальное назначение исследований с использованием ионизирующего излучения у беременных пациенток; назначение ультразвукового исследований (УЗИ) и магнитно-резонансной томографии (МРТ) вместо рентгенографии и КТ. Тем не менее, согласно методическим рекомендациям «Организация оказания медицинской помощи беременным, роженицам, родильницам и новорожденным при новой коронавирусной инфекции COVID-19», КТ органов грудной клетки является одним из методов выявления случаев заболевания COVID-19 у беременных с подозрением на инфекцию [6]. При этом подразумевается, что КТ органов грудной клетки не создает высоких доз облучения плода, но доступной информации по этому вопросу не представлено.

В соответствии с современными представлениями о воздействии ионизирующего излучения на плод наиболее опасным является облучение плода после 3–4 недель беременности [10–12]. Поглощенные дозы в плоде, превышающие 100 мГр, могут приводить к значительному снижению интеллекта [10, 14]. Высокая чувствительность к излучению наблюдается также в период формирования центральной нервной системы в период 8–15 недель после зачатия. К пороговым эффектам относятся врожденные пороки развития, задержки роста и развития и смерть [13].

Общепринятыми подходами по обеспечению радиационной защиты беременных пациенток, которые применяются как в зарубежной [15–16], так и отечественной практике¹, являются:

- проведение исследований с использованием ионизирующего излучения только по жизненным показаниям;

- оценка поглощенных доз в плоде у беременных женщин после каждого рентгенорадиологического исследования;

В отечественных НМД вводятся дополнительные ограничения:

- исследования по возможности проводятся во вторую половину беременности, за исключением случаев, когда решается вопрос о прерывании беременности или необходимости оказания скорой или неотложной помощи;

- ограничение поглощенной дозы в плоде 100 мГр, при превышении которых рекомендовано прерывание беременности.

К сожалению, на текущий момент утвержденные методики оценки поглощенной дозы в плоде в отечественной практике отсутствуют, что делает затруднительной оценку дозы в плоде до проведения исследования (для информирования пациентки и получения добровольного информированного согласия на проведение исследования) и после проведения исследования (для соблюдения требований ФЗ-3)². Также отсутствуют отечественные данные по дозам облучения плода при проведении рентгенологических исследований, что приводит к возникновению различного рода спекуляций и преувеличению негативных последствий проведения КТ-исследований, в том числе и женщинам с диагнозом COVID-19.

В соответствии с зарубежными подходами [5, 10, 11, 27, 28] в качестве эквивалента поглощенной дозы в плоде может использоваться поглощенная доза в матке. Для оценки поглощенной дозы в плоде при проведении КТ-исследований матери с разным сроком беременности используют специализированные программные продукты [21–24, 30–33].

Цель исследования – оценка доз облучения плода у беременных женщин, проходящих КТ-исследование органов грудной клетки в РФ в связи с диагностикой новой коронавирусной инфекции COVID-19, для оценки возможности развития детерминированных (пороговых) эффектов у плода. Для этого были собраны параметры отечественных протоколов КТ-сканирования органов грудной клетки, оценены поглощенные дозы в матке и эффективные дозы в плоде с использованием специализированного программного обеспечения.

Материалы и методы

Протоколы КТ-сканирования

Поиск публикаций, содержащих сведения о протоколах КТ-сканирования органов грудной клетки для беременных женщин в отечественной и зарубежной практике, осуществ-

¹ Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 18.02.2003 № 8 «О введении в действие СанПиН 2.6.1.1192-03» (вместе с «СанПиН 2.6.1.1192-03. 2.6.1. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований. Санитарные правила и нормативы», утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 14.02.2003) (Зарегистрировано в Минюсте РФ 19.03.2003 г. № 4282) [SanPiN 2.6.1193-03 “Hygienic requirements on the contents and use of the X-ray rooms, X-ray units and conduction of the X-ray examinations. Sanitary rules and norms”. Approved by the Chief State sanitary doctor of the Russian Federation 14.02.2003. Registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation 19.03.2003 N 4282 (In Russ.)]

² Федеральный закон «О радиационной безопасности населения» от 09.01.1996 № 3-ФЗ. [Federal state law “On the radiation safety of the public” #3-FZ (In Russ.)]

влялся в поисковых системах PubMed Central, Scopus и Web of Science, а также Elibrary. Ключевые слова для поиска: chest CT, pregnancy, radiation risk, organ dose, fetal dose, COVID-19, pneumonia. Всего было найдено 4 зарубежные публикации с протоколами КТ-сканирования органов грудной клетки у беременных на разных сроках беременности [2, 17–19] (табл. 1); отечественные источники отсутствовали.

Данные по отечественным протоколам КТ-сканирования органов грудной клетки были собраны на базе КТ-отделений крупных многопрофильных стационаров Санкт-Петербурга (табл. 2).

Оценка дозы в плоде

Для расчетов поглощенных доз в плоде использовали программное обеспечение NCICT3.0 [21], позволяющее определить поглощенные дозы в радиочувствительных органах матери, включая дозу в матке, а также поглощенные дозы в радиочувствительных органах плода и эффективную дозу для плода [21, 23, 24]. Для оценки доз используется семейство антропоморфных фантомов беременных женщин, состоящее из 8 фантомов, соответствующих 8-й, 10-й, 15-й, 20-й, 25-й, 30-й, 35-й, 38-й неделям беременности [25]. В этих фантомах учитывается увеличение объема и изменение расположения матки с учетом типичного расположения и размера плода (табл. 3). Для каждой не-

дели беременности в фантоме женщины реализован фантом плода с выделенными отдельными радиочувствительными органами и тканями [25].

В качестве длины сканирования была использована стандартная длина сканирования органов грудной клетки в NCICT 3.0 [21, 26], равная 330 мм, начиная от ключицы.

В работе была использована следующая схема обработки данных:

- определение объемного компьютерно-томографического индекса дозы ($CTDI_{vol}$) и произведения дозы на длину сканирования (DLP) для каждого из протоколов КТ-сканирования (см. табл. 1 и 2) с учетом модели КТ-аппарата, напряжения, произведения тока трубки на время оборота трубки и питч-фактора в программном обеспечении NCICT 3.0 с учетом специфики каждой из моделей КТ для стандартного дозиметрического фантома диаметром 32 см;
- расчет поглощенной дозы в матке пациентки и эффективной дозы для плода с использованием NCICT 3.0 и определенного $CTDI_{vol}$ для всех временных интервалов беременности (8, 10, 15, 20, 25, 30, 35 и 38 недель).

Статистическая обработка

Статистическая обработка данных была выполнена с использованием программного обеспечения Statistica 10.

Зарубежные протоколы КТ-сканирования органов грудной клетки для беременных пациенток

Таблица 1

[Table 1]

International protocols of the computed tomography of the chest for the pregnant patients

№	Статья, автор [Source, author]	Модель КТ-аппарата [CT-unit model]	Напряжение, кВ [Tube voltage, kV]	Экспозиция, мА·с [Exposure, mAs]	Питч-фактор [pitch]	$CTDI_{vol}$, мГр [$CTDI_{vol}$, mGy]	Срок беременности [Pregnancy period]
1	H. Liu, и др. 2020 [18]	64-срезовый КТ-сканер (uCT780, United imaging, China, or Optima 660, GE, USA) [64-slice CT scanner]	120	10-300	1,0875 или 1,375	–	От 20 до 40 недель [20 to 40 weeks]
2	Shahir, и др. 2010 [20]	8-, 16-, 64-срезовый КТ-сканер (LightSpeed Ultra, LightSpeed Plus, или LightSpeed VCT, GE) [8-, 16-, 64-slice CT scanner]	120–140	150-300	1	–	Первый, второй и третий триместры [First, second and third trimesters]
3	D. Liu, и др. 2020 [2]	Ingenuity Core 128, Philips	120	–	–	2,3 – 5,8	От 12 до 38 недель [12 to 38 weeks]
4	Angle, и др. 2008 [17]	LightSpeed 16, GE	120	100–300	1.375	–	От 5 до 36 недель [5 to 36 weeks]

Таблица 2

Отечественные протоколы КТ-сканирования органов грудной клетки для беременных пациенток

[Table 2]

St-Petersburg protocols of the computed tomography of the chest for the pregnant patients

Модель КТ-аппарата [CT-unit model]	Напряжение, кВ [Tube voltage, kV]	Экспозиция, мА·с [Exposure, mAs]	Питч-фактор [pitch]
Ingenuity 128, Philips	100	142	1,048
Somatom Definition AS, Siemens	120	175	–
Somatom Scope, Siemens	110	75	1,5
Emotion 16, Siemens	130	60	1,5

Для описания количественных показателей использовали методы непараметрической статистики. Для определения взаимосвязи показателей между собой использовали корреляционный анализ Спирмена; для определения различий между выборками – тест Краскелла – Уоллиса с дальнейшим попарным сравнением тестом Манна – Уитни. Все различия считали достоверными при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Результаты определения $CTDI_{vol}$, DLP, поглощенных доз в матке, использованных в качестве альтернативы

поглощенной дозе в плоде, а также эффективных доз в плоде представлены в таблицах 3 и 4 для зарубежных и отечественных протоколов КТ-сканирования органов грудной клетки соответственно.

Сравнение поглощенных доз в матке матери и эффективной дозы у плода (принимая во внимание, что $w_R=1$ для фотонного излучения) для объединенной выборки КТ-аппаратов для различных сроков беременности представлено на рисунке.

Достоверные различия между поглощенными дозами в матке и эффективными дозами у плода, определенными

Таблица 3
Дозовые характеристики для беременных женщин при КТ органов грудной клетки для зарубежных протоколов
[Table 3]

Dose characteristics for the pregnant women for the CT of the chest for the international protocols

Модель аппарата [CT-unit model]	$CTDI_{vol}^*$, мГр [$CTDI_{vol}^*$, mGy]	DLP, мГр×см [DLP, mGy×cm]	Срок беременности, неделя [Pregnancy period, week]	D_{matka}^{INCIST} , мГр [D_{uterus}^{INCIST} , mGy]	$E_{плод}^{INCIST}$, мЗв [E_{fetus}^{INCIST} , mSv]
Optima 600, GE	14,3	472	20	0,22	0,30
			25	0,26	0,29
			30	0,34	0,37
			35	0,78	0,91
			38	1,50	1,22
	11,3	373	20	0,17	0,23
			25	0,21	0,23
			30	0,27	0,29
			35	0,62	0,72
			38	1,18	0,97
LightSpeed VCT, GE	16,8	555	8	0,24	0,26
			10	0,27	0,27
			15	0,19	0,21
			20	0,25	0,33
			25	0,31	0,34
			30	0,40	0,43
			35	0,92	1,06
			38	1,76	1,44
			8	0,37	0,39
			10	0,41	0,41
LightSpeed Ultra, GE	25,7	849	15	0,29	0,31
			20	0,39	0,50
			25	0,47	0,53
			30	0,61	0,66
			35	1,40	1,63
			38	2,69	2,20
			8	0,19	0,21
			10	0,21	0,21
			15	0,15	0,17
			20	0,20	0,28
LightSpeed 16, GE	13,5	444	25	0,25	0,28
			30	0,32	0,35
			35	0,73	0,85

Окончание таблицы 3

Модель аппарата [CT-unit model]	CTDI ^{vol} , мГр [CTDI ^{vol} , mGy]	DLP, мГр×см [DLP, mGy×cm]	Срок беременности, неделя [Pregnancy period, week]	D ^{INCICT} _{матка} , мГр [D ^{INCICT} _{uterus} , mGy]	E ^{INCICT} _{плод} , мЗв [E ^{INCICT} _{fetus} , mSv]
Ingenuity Core 128, Philips	4,0	132	15	0,05	0,05
			20	0,06	0,08
			25	0,07	0,08
			30	0,10	0,10
			35	0,22	0,25
			38	0,42	0,34

Таблица 4

**Дозовые характеристики для беременных женщин при КТ органов грудной клетки для протоколов из отделений
КТ-диагностики медицинских организаций Санкт-Петербурга**

[Table 4]

Dose characteristics for the pregnant women for the CT of the chest for the St-Petersburg protocols

Модель аппарата [CT-unit model]	CTDI ^{vol} , мГр [CTDI ^{vol} , mGy]	DLP, мГр×см [DLP, mGy×cm]	Срок беременности, неделя [Pregnancy period, week]	D ^{INCICT} _{матка} , мГр [D ^{INCICT} _{uterus} , mGy]	E ^{INCICT} _{плод} , мЗв [E ^{INCICT} _{fetus} , mSv]
Siemens Emotion 16	6,1	202	8	0,09	0,09
			10	0,10	0,10
			15	0,07	0,08
			20	0,09	0,13
			25	0,11	0,12
			30	0,15	0,16
			35	0,33	0,39
			38	0,64	0,52
Philips Ingenuity 128	5,6	185	8	0,05	0,06
			10	0,06	0,06
			15	0,04	0,04
			20	0,06	0,08
			25	0,08	0,08
			30	0,10	0,10
			35	0,27	0,27
			38	0,53	0,38
Siemens Somatom Definition AS	9,3	306	8	0,13	0,14
			10	0,15	0,15
			15	0,10	0,12
			20	0,14	0,19
			25	0,17	0,19
			30	0,22	0,24
			35	0,50	0,59
			38	0,97	0,79
Siemens Somatom Scope	5,7	187	8	0,08	0,09
			10	0,09	0,09
			15	0,06	0,07
			20	0,09	0,12
			25	0,10	0,12
			30	0,14	0,15
			35	0,31	0,36
			38	0,59	0,49

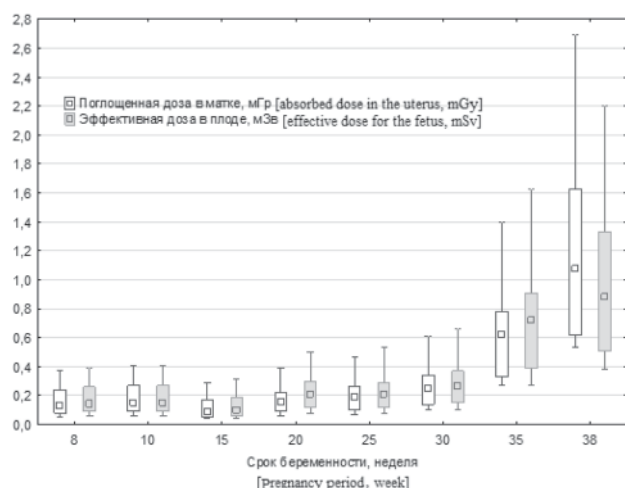


Рис. Сравнение поглощенной дозы в матке и эффективной дозы у плода для объединенной выборки компьютерных томографов для различных сроков беременности. Гистограммы представлены в формате: медиана, 25%–75%, минимум – максимум

[Fig.] Comparison between the absorbed dose in the uterus and effective dose for the fetus for the joint sample of CT-units for different pregnancy periods. Histograms are given as median, 25%–75% percentiles, minimum – maximum]

с помощью NCICT 3.0, для каждого срока беременности отсутствуют (тест Манна – Уитни, $p > 0,05$), что позволяет в дальнейшем использовать значения поглощенных доз в матке матери для оценки эффективной дозы у плода.

С 8-й по 20-ю недели беременности включительно медианные поглощенные дозы в матке матери практически не изменяются и находятся на уровне 0,1–0,15 мГр; максимальные – на уровне 0,4 мГр. С 25-й недели начинается рост поглощенных доз в среднем в полтора раза для каждого последующего срока беременности. Максимальные поглощенные дозы в матке составляют 0,5 мГр, 0,6 мГр, 1,4 мГр и 2,7 мГр для 25-й, 30-й, 35-й и 38-й недель соответственно.

Даже значения максимальных поглощенных доз в матке (плоде) (см. рис.), показывают, что для обследованных аппаратов и протоколов сканирования (см. табл. 1 и 2) порог развития детерминированных эффектов в плоде, принимаемый равным 100 мГр, вряд ли достижим даже при проведении многократных КТ-сканирований органов грудной клетки (вплоть до 10–15 раз) на любом сроке беременности. При этом дополнительных мер по защите области живота для беременной женщины также не требуется [29]. Использование средств индивидуальной защиты (свинцовые фартуки, пеленки и пр.) для ограничения облучения таза матери может быть рекомендовано только для того, чтобы успокоить и эмоционально поддержать пациентку. При проведении КТ-органов грудной клетки поглощенная доза в матке (плоде) будет формироваться исключительно за счет рассеянного излучения в теле матери, на которое средства индивидуальной защиты не оказывают влияния.

Заключение

В данной работе были определены поглощенные дозы в матке матери, а также эффективные дозы у плода для разных сроков беременности и для различных протоколов КТ-сканирования органов грудной клетки, используемых в зарубежной и отечественной практике, в том числе и при подозрении на новую коронавирусную инфекцию COVID-19. Расчеты были выполнены с использованием специализированного программного обеспечения NCICT 3.0.

Результаты расчетов показывают, что поглощенные дозы в матке матери и эффективные дозы у плода достоверно не отличаются друг от друга для всех исследованных сроков беременности. Максимальные значения доз, определенные для обследованных протоколов сканирования, находятся примерно на уровне в 0,5 мГр (мЗв) для сроков 8–25 недель, 0,6 мГр (мЗв) для 30-й недели, 1,4 мГр (мЗв) для 35-й недели и 2,7 мГр (мЗв) для 38-й недели. При таких поглощенных дозах предел развития детерминированных эффектов в плоде, принимаемый равным 100 мГр, вряд ли достижим даже при проведении многократных КТ-сканирований органов грудной клетки (вплоть до 10–15 раз) на любом сроке беременности для исследованных протоколов сканирования.

Таким образом, проведение КТ органов грудной клетки в качестве метода выбора диагностики и стадирования COVID-19 для беременных женщин не должно приводить к развитию детерминированных эффектов у плода. Тем не менее, согласно требованиям законодательства в области радиационной безопасности, проведение такого исследования должно сопровождаться обязательной оценкой поглощенной дозы в плоде до и после проведения сканирования. В отечественной практике для этого целесообразно использовать коэффициенты перехода от произведения дозы на длину сканирования к поглощенной дозе в матке (плоде). Дальнейшие работы будут направлены на получение таких коэффициентов для различных анатомических областей сканирования с учетом различных параметров протоколов КТ-сканирования.

Литература

1. Elicker B.M. What Is the Performance and Role of CT in Suspected COVID-19 Infection? // Radiology. 2021. Vol. 289, No 2. P. 109-111. URL: <https://pubs.rsna.org/doi/pdf/10.1148/radiol.20202040130> (Дата обращения: 28.07.2021).
2. Dehan L., Lin L., Xin W., et al. Pregnancy and Perinatal Outcomes of Women with Coronavirus Disease (COVID-19) Pneumonia: A Preliminary Analysis // American Journal of Roentgenology. 2020. P. 127-132.
3. Водоватов А.В., Романович И.К., Историк О.А., и др. Предварительная оценка изменения структуры и коллективной дозы от КТ-исследований за период март-июнь 2020 г. в связи с диагностикой COVID-19 В Российской Федерации // COVID-19 preprints. 2020. 15 p.
4. Vodovatov A.V., Romanovich I.K., Istoriik O.A., et al. PREPRINT – Preliminary assessment of structure and collective dose from CT examinations related to COVID-19 diagnostics in the Russian Federation in March // MedRxiv – the preprint server for health sciences – June 2020. 13 p. <https://doi.org/10.1101/2020.08.25.20181396>
5. Doll R., Wakeford R. Risk of childhood cancer from fetal irradiation // British Journal of Radiology. 1997. 70. P. 130-139.

6. Ministry of Health of the Russian Federation. Guidelines. Organization of medical care for pregnant women, women in labor, postpartum women and newborns with a new coronavirus infection COVID-19. Version 1 (04/24/2020). 2020. 143 p.
7. Ministry of Health of the Russian Federation. Guidelines. Prevention, diagnostics and treatment of new coronavirus infection (COVID-19). Version 10 (08.02.2021). 2021. 261 p.
8. American College of Radiology official website. Appropriateness-Criteria. On-Line resource. Available on: <https://www.acr.org/Clinical-Resources/ACR-Appropriateness-Criteria> (Дата обращения: 28.07.2021).
9. iRefer official website – On-Line resource – Available on: <https://www.irefer.org.uk/> (Дата обращения: 28.07.2021).
10. ICRP. Pregnancy and Medical Radiation/ICRP // Annals of the ICRP. Publication 84. 2000. Vol. 30, № 1. 62 p.
11. Damilakis J., Perisinakis K., Tzedakis A., et al. Radiation Dose to the Conceptus from Multidetector CT during Early Gestation: A Method That Allows for Variations in Maternal Body Size and Conceptus Position. // Radiology. 2010. Vol. 257. № 2. 483-489 p.
12. The Royal Australian and New Zealand College of Radiologists. Diagnostic Radiology and Pregnancy. Version 2.0. 2017. 16 p.
13. Tremblay E., Therasse E., Thomassin-Naggara I., Trop I., et al. Quality Initiatives Guidelines for Use of Medical Imaging during Pregnancy and Lactation // Radiographics. 2012. Vol. 32, No 3. P. 897-911. doi: 10.1148/rg.323115120
14. ICRP. Recommendations International Commission on Radiation Protection 2007. Publication ICRP No. 103. Transl. from English / Ed. M.F.M. Kiselev and N.K. Shandala. M., Ed. LLC PKF «Alana», 2009. 312 p.
15. Международное Агентство по Атомной Энергии. Радиационная Защита и Безопасность Источников Излучения: Международные Основные Нормы Безопасности. Общие требования безопасности. Серия норм МАГАТЭ по безопасности, № GSR Part 3. Вена: МАГАТЭ, 2015. 250 с.
16. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation. Specific Safety Guide, №SSG-46. Vienna: IAEA, 2018. 318 p.
17. Angel E., Wellnitz C.V., Goodsitt M.M., et al. Radiation dose to the fetus for pregnant patients undergoing multidetector CT imaging: Monte Carlo simulations estimating fetal dose for a range of gestational age and patient size // Radiology. 2008. Vol. 249, No 1. P. 220-7. DOI:10.1148/radiol.2491071665
18. Huanhuan L., Fang L., Jining L., et al. Clinical and CT imaging features of the COVID-19 pneumonia: Focus on pregnant women and children // Journal of Infection. 2020. P. 7 – 13.
19. Winer-Muram H.T., Boone J.M., Brown H.L., et al. Pulmonary embolism in pregnant patients: fetal radiation dose with helical CT // Radiology. 2002. P. 487–492.
20. Shahir K., Goodman L.R., Tali A., et al. Pulmonary Embolism in Pregnancy: CT Pulmonary Angiography Versus Perfusion Scanning // American Journal of Roentgenology. 2010. Vol. 195. P. 214-220.
21. Lee C., Kim K.P., Bolch W.E., et al. NCICT: a computational solution to estimate organ doses for pediatric and adult patients undergoing CT scans // Journal of Radiology Protection. 2015. Vol. 35, No 4. P. 891–909. doi: 10.1088/0952-4746/35/4/891
22. Saltybaeva N., Platon A., Poletti P.-A., et al. Radiation Dose to the Fetus From Computed Tomography of Pregnant Patients—Development and Validation of a Web-Based Tool // Investigative Radiology. 2020. Vol. 55, No 12. P. 762–768. <https://www.fetaldose.org/calculator> doi:10.1097/rli.0000000000000701
23. Chipiga L., Golikov V., Vodovatov A., Bernhardsson Ch. Comparison of Organ Absorbed Doses in Whole-Body Computed Tomography Scans of Paediatric and Adult Patient Models Estimated by Different Methods // Radiation Protection Dosimetry. 2021. URL: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncab086> (Дата обращения: 28.07.2021).
24. Chipiga L.A. A comparison of computational methods for estimation of effective and organ doses to the patients from CT examination // Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2017. Vol. 10, No 1. P. 56-64. (In Russian.) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-1-56-64>
25. Maynard M.R., Long N.S., Moawad N.S., et al. The UF Family of hybrid phantoms of the pregnant female for computational radiation dosimetry // Physics in Medicine and Biology. 2014. Vol. 59, No 15: 4325–4343. doi:10.1088/0031-9155/59/15/4325
26. Choonsik Lee. NCICT: user manual. 6p.
27. Huda W., Randazzo W., Tipnis S., et al. Embryo Dose Estimates in Body CT // American Journal of Radiology. 2010. Vol. 194. P. 874-880.
28. Matsunaga Yu., Kawaguchi A., Kobayashi M., et al. Fetal dose conversion factor for fetal computed tomography examinations: A mathematical phantom study // Journal of Applied Clinical Medical Physics. 2017. Vol. 18, No 5. P. 330–335.
29. ACR. ACR–SPR practice parameter for imaging pregnant or potentially pregnant adolescents and women with ionizing radiation. – 2018. – 23p. On-Line resource – URL: <https://www.acr.org/-/media/acr/files/practice-parameters/pregnant-pts.pdf> (Дата обращения: 28.07.2021)
30. Xu X.G., Taranenko V., Zhang J., et al. A boundary-representation method for designing whole-body radiation dosimetry models: pregnant females at the ends of three gestational periods—RPI-P3, -P6 and -P9 // Physics in Medicine and Biology. 2007. Vol. 52. P. 7023–7044.
31. Stamm G., Nagel H.D. CT-Expo V 2.3. A Tool for Dose Evaluation in Computed Tomography. User's Guide, 2014. 59p.
32. Lewis M.A., Edyvean S., Sassi S.A., et al. Estimating patient dose on current CT scanners: Results of the ImPACT CT dose survey // Radiations Magazine. 2000. Vol. 26. P. 17–18.
33. Sahbaee P., Segars W.P., Samei E., et al. Patient-based estimation of organ dose for a population of 58 adult patients across 13 protocol categories // Medical Physics. 2014. Vol. 41, № 7. P. 072104-1– 072104-12.

Поступила: 02.08.2021 г.

Водоватов Александр Валерьевич – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией радиационной гигиены медицинских организаций, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, доцент кафедры гигиены, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет. **Адрес для переписки:** 197101, ул. Мира 8, Санкт-Петербург, Российская Федерация. E-mail: vodovattoff@gmail.com

Чипига Лариса Александровна – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева; научный сотрудник Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова Минздрава России; доцент кафедры ядерной медицины и радиационных технологий Национального медицинского исследовательского центра им. В.А. Алмазова Минздрава России, Санкт-Петербург, Россия

Пивень Павел Алексеевич – студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Высшей инженерно-физической школы, Санкт-Петербург, Россия

Труфанов Геннадий Евгеньевич – доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник Научно-исследовательского отдела, заведующий кафедрой лучевой диагностики и медицинской визуализации Института медицинского образования Центра Алмазова, Санкт-Петербург, Россия

Беркович Глеб Владимирович – заведующий кабинетом компьютерной томографии, Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова, Санкт-Петербург, Россия

Мащенко Ирина Александровна – кандидат медицинских наук, заведующий группой – ведущий научный сотрудник научно-исследовательской группы лучевых методов исследования в перинатологии и педиатрии, ассистент кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации Института медицинского образования Центра Алмазова, Санкт-Петербург, Россия

Дружинина Полина Сергеевна – младший научный сотрудник, лаборатория радиационной гигиены медицинских организаций, федеральное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева», Санкт-Петербург, Россия

Пузырев Виктор Геннадьевич – кандидат медицинских наук, доцент, заведующий кафедрой общей гигиены, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

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

Для цитирования: Водоватов А.В., Чипига Л.А., Пивень П.А., Труфанов Г.Е., Беркович Г.В., Мащенко И.А., Дружинина П.С., Пузырев В.Г. Оценка поглощенных доз в плоде при проведении компьютерной томографии органов грудной клетки беременной женщины // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 3. С. 126-135. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-126-135

Assessment of the absorbed doses in the fetus from the computed tomography of the chest for the pregnant women

Aleksandr V. Vodovatov^{1,2}, Larisa A. Chipiga^{1,3,4}, Pavel A. Piven⁵, Gennadiy E. Trufanov⁴, Gleb V. Berkovich⁴, Irina A. Mashchenko⁴, Polina S. Druzhinina¹, Viktor G. Puzyrev², Sergey A. Ryzhov^{6,7}

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 Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

³ Granov Russian Research Center of Radiology and Surgical Technologies, Saint-Petersburg, Russia

⁴ Almazov National Medical Research Centre, Saint-Petersburg, Russia

⁵ Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia

⁶ Research and Practice Center of Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow, Russia

⁷ Dmitry Rogachev National Medical Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology, Moscow, Russia

The number and contribution of high dose imaging modalities, computed tomography in particular, is rapidly increasing both in the Russian Federation and other developed countries. Maximal increase in the number of computed tomography examinations in Russia was observed in 2020 due to the full-scale applica-

Aleksandr V. Vodovatov

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

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

tion of this imaging modality for the diagnostics of the novel coronavirus infection COVID-19. The use of computed tomography for the examination of the chest for the pregnant women is associated with several issues. An internationally accepted approach for the provision of the radiation safety of the pregnant patients is the assessment of the absorbed dose in the fetus after each X-ray examination. However, there are no existing approved methods for the assessment of the absorbed dose in the fetus in the Russian Federation. The aim of the current study was to assess the doses in the fetus for the pregnant women undergoing computed tomography of the chest due to the COVID-19 and to estimate the probability of the development of the deterministic effects for the fetus. The study was based on the collection of the parameter of Russian and international computed tomography protocols. Parameters of the international computed tomography protocols were collected via meta-analysis of the existing publications; Russian protocols – via data collection in computed tomography departments in St-Petersburg hospitals. Absorbed dose in the uterus of the female patient and effective dose for the fetus were calculated using NCICT 3.0 software for 8, 10, 15, 20, 25, 30, 35 and 38 weeks of pregnancy. The results of the calculations indicate the lack of significant differences between absorbed doses in the uterus and effective doses for the fetus for all stages of pregnancy. Maximal doses for the selected computed tomography protocols were in the range of 0.5 mGy (mSv) for 8–25 weeks, 0.6 mGy (mSv) for 30 week, 1.4 mGy (mSv) for 35 week and 2.7 mGy (mSv) for 38 week. The threshold for the development of the deterministic effects equal to 100 mGy cannot be exceeded even for repeated (10–15) computed tomography chest scans. Hence, the use of computed tomography as the primary method of COVID-19 diagnostics and staging will not be associated with the development of deterministic effects in the fetus.

Key words: computed tomography. Absorbed dose in the fetus, COVID-19, novel coronavirus infection.

References

1. Elicker BM. What Is the Performance and Role of CT in Suspected COVID-19 Infection? *Radiology*. 2021;289(2): 109–111. Available on: <https://pubs.rsna.org/doi/pdf/10.1148/radiol.20202040130> (Accessed: 28.07.2021)
2. Dehan L, Lin L, Xin W, et al. Pregnancy and Perinatal Outcomes of Women with Coronavirus Disease (COVID-19) Pneumonia: A Preliminary Analysis. *American Journal of Roentgenology*. 2020; 127–132.
3. Vodovatov AV, Romanovich IK, Istoriok OA, Eremina LA, Morozov SP, Ryzhov SA, et al. PREPRINT – Preliminary assessment of structure and collective dose from CT examinations related to COVID-19 diagnostics in the Russian Federation in March. COVID-19 preprints-June 2020; 2020. 15. (In Russian)
4. Vodovatov AV, Romanovich IK, Istoriok OA, Eremina LA, Morozov SP, Ryzhov SA, et al. PREPRINT – Preliminary assessment of structure and collective dose from CT examinations related to COVID-19 diagnostics in the Russian Federation in March. *MedRxiv* – the preprint server for health sciences. June 2020; 2020. 13 p. <https://doi.org/10.1101/2020.08.25.20181396>
5. Doll R, Wakeford R. Risk of childhood cancer from fetal irradiation. *British Journal of Radiology*. 1997;70: 130–139.
6. Ministry of Health of the Russian Federation. Guidelines. Organization of medical care for pregnant women, women in labor, postpartum women and newborns with a new coronavirus infection COVID-19. Version 1 (04/24/2020); 2020. 143 p.
7. Ministry of Health of the Russian Federation. Guidelines. Prevention, diagnostics and treatment of new coronavirus infection (COVID-19). Version 10 (08.02.2021); 2021. 261 p.
8. American College of Radiology. Official website. Appropriateness-Criteria. On-Line resource. Available on: <https://www.acr.org/Clinical-Resources/ACR-Appropriateness-Criteria> (Accessed: 28.07.2021).
9. iRefer official website. Available on: <https://www.irefer.org.uk/> (Accessed: 28.07.2021).
10. ICRP. Pregnancy and Medical Radiation. Annals of the ICRP. Publication 84. 2000;30(1): 62.
11. Damilakis J, Perisinakis K, Tzedakis A, Papadakis A, Karantanis A. Radiation Dose to the Conceptus from Multidetector CT during Early Gestation: A Method That Allows for Variations in Maternal Body Size and Conceptus Position. *Radiology*. 2010;257(2): 483–489.
12. The Royal Australian and New Zealand College of Radiologists. Diagnostic Radiology and Pregnancy. Version 2.0; 2017. 16 p.
13. Tremblay E, Thérasse E, Thomassin-Naggara I, Trop I. Quality Initiatives Guidelines for Use of Medical Imaging during Pregnancy and Lactation. *Radiographics*. 2012;32(3): 897–911. doi: 10.1148/rg.323115120
14. ICRP. Recommendations International Commission on Radiation Protection 2007. Publication ICRP No. 103. Transl. from English. Ed. M.F. Kiselev and N.K. Shandala. Moscow: Ed. LLC PKF «Alana»; 2009. 312 p.
15. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General safety requirements. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. Vienna: IAEA; 2015. 250. (In Russian)
16. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation. Specific Safety Guide, N°SSG-46. Vienna: IAEA; 2018. 318.
17. Angel E, Wellnitz CV, Goodsitt MM, et al. Radiation dose to the fetus for pregnant patients undergoing multidetector CT imaging: Monte Carlo simulations estimating fetal dose for a range of gestational age and patient size. *Radiology*. 2008;249(1): 220–7. DOI: 10.1148/radiol.2491071665
18. Huanhuan L, Fang L, Jining L, et al. Clinical and CT imaging features of the COVID-19 pneumonia: Focus on pregnant women and children. *Journal of Infection*. 2020; 7 – 13.
19. Winer-Muram HT, Boone JM, Brown HL, et al. Pulmonary embolism in pregnant patients: fetal radiation dose with helical CT. *Radiology*. 2002; 487–492.
20. Shahir K, Goodman LR, Tali A, et al. Pulmonary Embolism in Pregnancy: CT Pulmonary Angiography Versus Perfusion Scanning. *American Journal of Roentgenology*. 2010;195: 214–220.
21. Lee C, Kim KP, Bolch WE, Moroz BE, Folio L. NCICT: a computational solution to estimate organ doses for pediatric and adult patients undergoing CT scans. *Journal of Radiology Protection*. 2015;35(4): 891–909. doi: 10.1088/0952-4746/35/4/891
22. Saltybaeva N, Platon A, Poletti PA, Hinzpeter R, Merce MS, Alkadhi H. Radiation Dose to the Fetus from Computed Tomography of Pregnant Patients—Development and Validation of a Web-Based Tool. *Investigative Radiology*. 2020;55(12): 762–768. Available on: <https://www.fetal-dose.org/calculator>. doi:10.1097/rri.0000000000000701 (Accessed: 28.07.2021).

23. Chipiga L, Golikov V, Vodovatov A, Bernhardsson Ch. Comparison of Organ Absorbed Doses in Whole-Body Computed Tomography Scans of Paediatric and Adult Patient Models Estimated by Different Methods. *Radiation Protection Dosimetry*. 2021. Online resource. Available from: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncab086> (Accessed: 28.07.2021).
24. Chipiga LA. A comparison of computational methods for estimation of effective and organ doses to the patients from CT examination. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(1): 56-64. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-1-56-64>
25. Maynard MR, Long NS, Moawad NS, Shifrin RY, Geyer AM, Fong G, et al. The UF Family of hybrid phantoms of the pregnant female for computational radiation dosimetry. *Physics in Medicine and Biology*. 2014;59(15): 4325–4343. doi:10.1088/0031-9155/59/15/4325
26. Choonsik Lee. NCIC: user manual. 6 p.
27. Huda W, Randazzo W, Tipnis S, Frey GD, Mah E, et al. Embryo Dose Estimates in Body CT. *American Journal of Radiology*. 2010;194: 874-880.
28. Matsunaga Yu, Kawaguchi A, Kobayashi M, Suzuki Sh, Asada Ya, Ito K, et al. Fetal dose conversion factor for fetal computed tomography examinations: A mathematical phantom study. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*. 2017;18(5): 330–335.
29. ACR. ACR–SPR practice parameter for imaging pregnant or potentially pregnant adolescents and women with ionizing radiation. 2018. 23 p. Available on: <https://www.acr.org/-/media/acr/files/practice-parameters/pregnant-pts.pdf> (Accessed: 28.07.2021).
30. Xu XG, Taranenko V, Zhang J, et al. A boundary-representation method for designing whole-body radiation dosimetry models: pregnant females at the ends of three gestational periods—RPI-P3, -P6 and -P9. *Physics in Medicine and Biology*. 2007;52: 7023–7044.
31. Stamm G, Nagel HD. CT-Expo V 2.3. A Tool for Dose Evaluation in Computed Tomography. User's Guide; 2014. 59 p.
32. Lewis MA, Edyvean S, Sassi SA, et al. Estimating patient dose on current CT scanners: Results of the ImPACT CT dose survey. *Radiations Magazine*. 2000;26: 17–18.
33. Sahbaee P, Segars WP, Samei E, et al. Patient-based estimation of organ dose for a population of 58 adult patients across 13 protocol categories. *Medical Physics*. 2014;41(7): 072104-1– 072104-12.

Received: August 02, 2021

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

Larisa A. Chipiga – Ph.D., research fellow, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being; research fellow, Granov Russian Research Center of Radiology and Surgical Technologies; docent, Almazov National Medical Research Centre, Saint-Petersburg, Russia

Pavel A. Piven – Student of Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Higher Engineering Physics School, Saint-Petersburg, Russia

Gennady E. Trufanov – Doctor of Medical Sciences, Professor, Leading Researcher of the Research Institute of Radiation Diagnostics, Head of the Department of Radiation Diagnostics and Medical Imaging, Institute of Medical Education, Almazov Center, Saint-Petersburg, Russia

Gleb V. Berkovich – Head of the Computed Tomography department, V. Almazov National Medical Research Center, Saint-Petersburg, Russia

Irina A. Mashchenko – PhD, Head of the Group – Leading Researcher of the Research Institute of Radiation Research in Perinatology and Pediatrics, Assistant of the Department of Radiation Diagnostics and Medical Imaging, Institute of Medical Education, Almazov Center, Saint-Petersburg, Russia

Polina S. Druzhinina – junior researcher, Medical Protection Laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

Viktor G. Puzyrev – MD, Ph.D., Assistant Professor, the Head of the Department of General Hygiene, St. Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

Sergey A. Ryzhov – vice president of the Association of Medical Physicists in Russia, research fellow in the Research and Practice Center of Diagnostics and Telemedicine Technologies, head of the radiation safety and medical physics department of the Dmitry Rogachev National Medical Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology, Moscow, Russia

For citation: Vodovatov A.V., Chipiga L.A., Piven P.A., Trufanov G.E., Berkovich G.V., Mashchenko I.A., Druzhinina P.S., Puzyrev V.G., Ryzhov S.A. Assessment of the absorbed doses in the fetus from the computed tomography of the chest for the pregnant women. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No. 3, P. 126-135. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-126-135

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 под рисунками 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., Сосякин 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.