

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

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

ТОМ 16 № 1, 2023



**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 150 экз.

ISSN 1998-426X



9 771998 426783 >

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

© «Радиационная гигиена», 2023

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

RADIATIONNAYA GYGIENA

Председатель редакционного совета
Г.Г. Онищенко

Главный редактор
И.К. Романович



Том 16 № 1, 2023

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

Том 16 № 1, 2023

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

Александрин 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)

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)

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)

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; к.м.н., доцент (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)

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. 16 № 1, 2023

Chairman of Editorial Council

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

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

Members of Editorial Council

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

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

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

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

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)

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)

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. Vodovатов — 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; Candidate of Medicine, Associate Professor (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)

Mattsson Lars Juhan Sören — Professor of medical radiation physics department of Lund University (Malmö, 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 16 № 1, 2023

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

Кормановская Т.А., Романович И.К., Вяльцина Н.Е., Гаевой С.В., Бондарь Л.В., Кононенко Д.В., Сапрыкин К.А., Кокоулина Е.С., Балабина Т.А., Королева Н.А. Облучение населения Оренбургской области природными источниками ионизирующего излучения Часть 1: Результаты комплексного радиационного обследования населенных пунктов восточных районов Оренбургской области6	
Крестинина Л.Ю., Силкин С.С. Риск смерти от солидных злокачественных новообразований в Уральской когорте аварийно-облученного населения: 1950–201919	
Купцова П.С., Комарова Л.Н., Выпова Е.Р. Исследование радиопротекторных свойств фумаровой кислоты и фумарата 3-оксипиридина при действии ионизирующего излучения на клетки человека32	
Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Варфоломеева К.В., Некрасов В.А. Радиационная обстановка в молодом сосновом лесу, выросшем после Чернобыльской аварии.....40	
Репин Л.В. Оценка радиационного ущерба для здоровья: о возможности использования эффективной дозы для расчета числа потерянных лет здоровой жизни52	
Лантух З.А., Тлигулов Ю.А., Солдатов И.В., Толкачев К.В., Дружинина Ю.В., Шатенок М.П., Рыжов С.А., Васильев Ю.А. Необоснованные направления на рентгенорадиологические исследования и их влияние на коллективную эффективную дозу пациентов в амбулаторных медицинских организациях.....66	
Тельнов В.И., Азизова Т.В., Мосеева М.Б., Банникова М.В. Продолжительность жизни у работников ПО «Маяк» после острой лучевой болезни разной степени тяжести80	
Крестинина Л.Ю., Силкин С.С. Риск онкологических заболеваний репродуктивных органов у женщин Уральской когорты аварийно-облученного населения: 1956–201991	
ОБЗОРЫ	
Фесенко С.В., Прудников П.В., Исамов Н.Н., Емлютина Е.С., Епифанова И.Э., Шубина О.А. Динамика содержания ¹³⁷ Cs в кормах сельскохозяйственных животных в районах Брянской области, пострадавших после аварии на ЧАЭС104	
Сарычева С.С. Актуализация методики установления референтных диагностических уровней для интервенционных рентгенологических процедур120	
ЮБИЛЕЙ К 95-летию юбилею Леонида Андреевича Ильина...130	
ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА «РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА»132	

CONTENTS

Vol. 16 № 1, 2023

RESEARCH ARTICLES

Kormanovskaya T.A., Romanovich I.K., Vyaltsina N.E., Gaevoy S.V., Bondar L.V., Kononenko D.V., Saprykin K.A., Kokoulina E.S., Balabina T.A., Koroleva N.A. Public exposure in the Orenburg region due to natural sources of ionizing radiation. Part 1: Results of the comprehensive survey of settlements in the eastern districts of the Orenburg region17	
Krestinina L.Yu., Silkin S.S. Solid cancer mortality risk in the Southern Urals populations exposed to radiation cohort: 1950–2019.....30	
Kuptsova P.S., Komarova L.N., Vypova E.R. Study of the radioprotective properties of fumaric acid and 3-hydroxypyridine fumarate under the action of ionizing radiation on human cells38	
Ramzaev V.P., Barkovsky A.N., Varfolomeeva K.V., Nekrasov V.A. Radiological situation in the young pine forest that grew after the Chernobyl accident50	
Repin L.V. Radiation detriment estimation: on the possibility of effective dose usage to assess the number of years of the healthy life lost64	
Lantukh Z.A., Tligurov Yu.A., Soldatov I.V., Tolkahev K.V., Druzhinina Yu.V., Shatenok M.P., Ryzhov S.A., Vasilyev Yu.A. Unjustified referrals to radiological examinations and their impact on the collective effective dose of patients in outpatient medical organizations77	
Telnov V.I., Azizova T.V., Moseeva M.B., Bannikova M.V. Lifetime of Mayak workers after acute radiation syndrome of various severity levels.....88	
Krestinina L.Yu., Silkin S.S. Cancer incidence risk of female reproductive organs in the Southern Urals Populations Exposed to Radiation Cohort: 1956–2019.....102	
REVIEWS	
Fesenko S.V., Prudnikov P.V., Isamov N.N., Emlyutina E.S., Epifanova I.E., Shubina O.A. Dynamics of ¹³⁷ Cs concentrations in agricultural products after the Chernobyl accident: cereals, potato, and vegetables118	
Sarycheva S.S. Actualization of methodology of diagnostic reference levels establishment for interventional radiological procedures.....128	
ANNIVERSARY To the 95th anniversary of L.A. Ilyin.....130	
JOURNAL OF RADIATION HYGIENE – INSTRUCTIONS FOR AUTHORS.....132	

Облучение населения Оренбургской области природными источниками ионизирующего излучения

Часть 1:

Результаты комплексного радиационного обследования населенных пунктов восточных районов Оренбургской области

Т.А. Кормановская¹, И.К. Романович¹, Н.Е. Вяльцина², С.В. Гаевой², Л.В. Бондарь³,
Д.В. Кононенко¹, К.А. Сапрыкин¹, Е.С. Кокоулина¹, Т.А. Балабина¹, Н.А. Королева¹

¹ Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

² Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Оренбургской области, Оренбург, Россия

³ Центр гигиены и эпидемиологии в Оренбургской области, Оренбург, Россия

В статье приведены результаты комплексного радиационного обследования, проведенного в 2019 г. в 6 районах восточной части Оренбургской области в 37 населенных пунктах, в которых ранее были выявлены повышенные уровни содержания природных радионуклидов в воде подземных источников питьевого водоснабжения. Обследование включало в себя определение уровней содержания радона в зданиях жилого и общественного назначения, а также измерение мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения в зданиях и на открытой местности на территории населенных пунктов. В ходе обследования в воздухе отдельных помещений жилых домов в 23 населенных пунктах и общественных зданий в 25 населенных пунктах были получены значения среднегодовой эквивалентной равновесной объемной активности изотопов радона, превышающие гигиенический норматив для эксплуатируемых зданий 200 Бк/м³. Максимальные оценки среднегодовой эквивалентной равновесной объемной активности изотопов радона, полученные для отдельных жилых домов п. Нововинницкое, с. Брацлавка, с. Аниховка Адамовского района, составили 1242, 987 и 942 Бк/м³ соответственно; в общественных зданиях аналогичные показатели составили: в с. Кваркено – 2291 Бк/м³, в с. Карабутак – 1114 Бк/м³, в с. Нововинницкое – 923 Бк/м³. Ни в одном из обследованных населенных пунктов не было выявлено превышений установленных нормативов по величине мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения на открытой местности и в помещениях зданий. Результаты комплексного радиационного обследования показали, что основная причина высоких уровней содержания радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий в населенных пунктах восточных районов Оренбургской области не связана с использованием воды подземных источников водоснабжения с повышенными уровнями содержания природных радионуклидов.

Ключевые слова: природные источники ионизирующего излучения, природные радионуклиды, радон, дочерние продукты распада, экспрессные измерения, интегральные измерения, трековые детекторы, подземные источники водоснабжения, питьевая вода, мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения, Оренбургская область.

Введение

Выявление с 2014 г. в воде подземных источников водоснабжения ряда населенных пунктов восточных районов Оренбургской области (подземные воды для данной территории являются единственным источником обеспечения населения питьевой водой) повышенных уровней

содержания природных радионуклидов (ПРН) послужило основанием для планирования и проведения комплексного радиационного обследования и гигиенической оценки уровней облучения жителей данных населенных пунктов природными источниками ионизирующего излучения (ПИИИ) с целью определения значимости вклада

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

облучения за счет потребления питьевой воды в суммарную дозу природного облучения населения. Комплексное радиационное обследование было выполнено в 2019 г. в районах восточного Оренбуржья (Адамовский, Кваркенский, Новоорский, Домбаровский, Светлинский и Ясненский городской округ (ГО)) специалистами ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева совместно с Управлением Роспотребнадзора по Оренбургской области и ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Оренбургской области» в рамках Государственного контракта.

При проведении обследования, кроме исследований питьевой воды, ход и результаты которых подробно изложены в [1], для оценки доз внешнего облучения и внутреннего облучения за счет ингаляции радона населения данной территории были выполнены измерения мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения на открытой местности населенных пунктов, а также измерения МАЭД гамма-излучения и уровней содержания радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий в населенных пунктах, где ранее выявлялись повышенные значения содержания ПРН в воде подземных источников.

В 1954–1955 гг. в целях увеличения сельскохозяйственного производства СССР было начато освоение целинных и залежных земель в Адамовском, Новоорском, Кваркенском и других восточных районах Оренбургской (в 1938–1957 гг. – Чкаловской) области [2]. Интенсивное строительство жилых и общественных зданий для целинников в середине XX в. во многом определяет облик сельских населенных пунктов восточного Оренбуржья и по сей день: наиболее распространенным типом жилых зданий там являются одноэтажные саманные или шлакобетонные дома на 1–2 семьи, установленные на ленточном фундаменте. Зачастую в аналогично построенных зданиях (рис.) располагаются детские и общественные учреждения, администрации поселков и фельдшерско-акушерские пункты (ФАП).



Рис. Типичное по строительным характеристикам здание в сельском населенном пункте восточной части Оренбургской области (авторская фотография)

[Fig. A typical building in terms of construction characteristics in a rural settlement in the eastern part of the Orenburg region (author's picture)]

Отличительной чертой таких зданий является, как правило, отсутствие подвалов; часть жителей оборудуют под жилыми домами подпольное пространство для хранения продуктов, не заботясь при этом ни о вентилировании подпола, ни о герметизации его пола и стен. Таким образом, создаются наиболее благоприятные условия для проникновения в жилые помещения почвенных газов, выходящих из грунта под зданием.

Фактор внешнего облучения населения за счет пребывания в зданиях подобного типа также не был изучен в достаточной мере, так как при их строительстве в середине XX в. не проводилось ни контроля используемых строительных материалов в части содержания радионуклидов, ни радиационного обследования при приемке зданий в эксплуатацию.

Необходимо отметить, что на момент выполнения комплексного радиационного обследования в населенных пунктах ряда восточных районов Оренбуржья достаточным объемом достоверных данных для определения и классификации уровней облучения населения этой части региона за счет ПИИИ специалисты Роспотребнадзора не располагали.

Цель исследования – определение показателей природного облучения населения восточных районов Оренбургской области.

Для достижения цели необходимо было решить следующие задачи:

- выполнить радиационное обследование на открытой местности на территории населенных пунктов, в помещениях жилых и общественных зданий;
- провести оценку значимости вклада радона, поступающего в воздух помещений из воды подземных источников водоснабжения с повышенным содержанием ПРН, в ингаляционное облучение населения за счет радона.

Виды, объем и методы исследований

В рамках выполнения комплексного радиационного обследования жилых и общественных зданий в населенных пунктах Адамовского, Кваркенского, Новоорского, Домбаровского, Светлинского районов и Ясненского ГО в 2019 г. специалистами ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева совместно с Управлением Роспотребнадзора по Оренбургской области и ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Оренбургской области» было проведено:

- 1) 183 измерения МАЭД гамма-излучения (средства измерений – измерители-сигнализаторы поисковые ИСП-РМ1704А) на открытой местности и 1226 измерений МАЭД гамма-излучения в 322 зданиях жилого и общественного назначения (в том числе 793 измерения в 117 зданиях общественного назначения и 433 измерения – в 205 жилых домах) в 35 населенных пунктах;
- 2) определение уровней содержания радона в 435 зданиях (в 121 здании общественного назначения и в 314 жилых домах) в 37 населенных пунктах, в том числе:
 - 1226 измерений эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) изотопов радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий, в том числе 793 измерения в зданиях общественного назначения и 433 измерения – в жилых домах (средства измерений – комплек-

сы измерительные для мониторинга радона, торона и их дочерних продуктов «Альфа рад плюс», модификации «А» и «АР»);

– 596 измерений объемной активности (ОА) радона в воздухе жилых и общественных зданий (из 600 расставленных трековых радиометров 4 были утрачены), в том числе 325 измерений в зданиях общественного назначения и 271 измерение – в жилых домах (средство измерений – комплект аппаратуры для измерения средней объемной активности радона в воздухе трековым методом ТРЕК-РЭИ-1М).

Выбор населенных пунктов для проведения комплексного радиационного обследования был обоснован полу-

ченными ранее данными о повышенном содержании ПРН в питьевой воде подземных источников водоснабжения населения [1].

При проведении исследований уровней содержания радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий был использован как мгновенный (экспрессный) метод определения ЭРОА изотопов радона в воздухе, так и интегральный метод определения ОА радона в воздухе помещений с использованием интегральных трековых радиометров радона (ИТРР). Данные о количестве измерений, проведенных обоими методами в каждом из обследованных населенных пунктов, приведены в таблице 1. Измерения содержания радона в воздухе помещений жилых и общественных

Таблица 1

Количество измерений содержания радона в воздухе помещений, выполненных в рамках обследования

[Table 1]

Number of indoor radon concentration and EEC measurements taken as part of the survey]

Населенный пункт [Settlement]	Общественные здания [Public buildings]		Жилые здания [Dwellings]	
	Экспрессные измерения [Instant measure-ments]	Интегральные измерения [Long-term measure-ments]	Экспрессные измерения [Instant measure-ments]	Интегральные измерения [Long-term measure-ments]
Адамовский район [Adamovsky district]				
п. Адамовка [Adamovka]	37	—	—	—
с. Андреевка [Andreevka]	13	6	10	4
с. Аниховка [Anikhovka]	38	12	21	8
п. Белополье [Belopol'e]	14	6	16	4
с. Брацлавка [Bratslavka]	29	6	20	4
п. Джарлинский [Dzharlinskiy]	19	13	13	8
с. Джасай [Dzhasay]	16	7	12	2
п. Жуламансай [Zhulamansay]	10	8	10	8
с. Карабутак [Karabutak]	8	8	9	8
п. Мещеряковский [Meshcheryakovskiy]	9	7	8	4
с. Нижняя Кийма [Nizhnyaya Kiyma]	14	7	13	7
п. Нововинницкое [Novovinnitskoe]	8	—	14	—
п. Теренсай [Terensay]	40	12	24	8
п. Энбекши [Enbekshi]	8	8	8	8
Итого по району [Total]	263	100	178	73
	363		251	
Домбаровский район [Dombarovsky district]				
п. Домбаровский [Dombarovskiy]	125	18	24	—
с. Караганда [Karaganda]	7	—	10	—
Итого по району [Total]	132	18	34	—
	150		34	
Кваркенский район [Kvarkensky district]				
п. Айдырлинский [Aydyrlinskiy]	14	13	8	8
с. Аландское [Alandskoe]	28	16	12	6
с. Бриент [Brient]	12	8	14	16
с. Екатериновка [Ekaterinovka]	17	16	6	20
с. Зеленодольск [Zelenodol'sk]	10	8	10	8
с. Кваркено [Kvarkeno]	44	22	34	16

Населенный пункт [Settlement]	Общественные здания [Public buildings]		Жилые здания [Dwellings]	
	Экспрессные измерения [Instant measure-ments]	Интегральные измерения [Long-term measure-ments]	Экспрессные измерения [Instant measure-ments]	Интегральные измерения [Long-term measure-ments]
п. Кировск [Kirovsk]	24	18	8	12
п. Красноярский [Krasnoyarskiy]	44	24	28	10
с. Новооренбург [Novoorenburg]	20	14	2	4
с. Приморск [Primorsk]	16	10	8	6
с. Таналык [Tanalyk]	—	—	—	2
Итого по району [Total]	229	149	130	108
	378		238	
Новоорский район [Novoorsky district]				
с. Караганка [Karaganka]	39	16	8	—
п. Новоорск [Novoorsk]	—	12	—	66
с. Тасбулак [Tasbulak]	12	—	8	—
Итого по району [Total]	51	28	16	66
	79		82	
Светлинский район [Svetlinsky district]				
п. Актюбинский [Aktyubinskiy]	17	8	11	—
п. Восточный [Vostochnyy]	22	6	6	8
Итого по району [Total]	39	14	17	8
	53		25	
Ясененский ГО [Yasnensky urban okrug]				
с. Верхний Кiemбай [Verkhniy Kiembay]	—	—	2	—
с. Еленовка [Elenovka]	24	—	16	—
п. Комарово [Komarovo]	22	8	14	8
с. Котансу [Kotansu]	—	—	12	—
п. Новосельский [Novosel'skiy]	33	8	14	8
Итого по району [Total]	79	16	58	16
	95		74	

зданий проводились в весенние и осенние месяцы, когда температурный режим обеспечивал отсутствие повышенного воздухообмена в помещениях, характерного для летнего сезона в сельских населенных пунктах Оренбургской области. Комплексное радиационное обследование проводилось в зданиях разной этажности, построенных с применением различных строительных материалов (кирпич, шлакоблоки, пеноблоки, дерево, саман и др.), как с наличием, так и с отсутствием подвала.

Статистический анализ результатов измерений содержания радона в воздухе помещений был проведен

для каждого из обследованных районов и 2 типов зданий (общественные и жилые) в соответствии с подходом, описанным в работе [3] и усовершенствованным в работе [4], и включал в себя следующий комплекс процедур:

– анализ характера распределений значений ОА радона и натурального логарифма ОА радона и степени их соответствия логнормальному и нормальному законам соответственно, включая анализ на наличие выбросов (верхних экстремальных значений); для этого измеренные значения ЭРОА радона были пересчитаны в ОА радона с использованием коэффициента радиоактивного равновесия между радоном и

¹ Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после окончания их строительства, капитального ремонта, реконструкции по показателям радиационной безопасности: Методические указания МУ 2.6.1.2838-11. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 28.01.2011 г. (далее – МУ 2.6.1.2838-11). [Radiation control and sanitary and epidemiological assessment of residential, public and industrial buildings and facilities after their construction, overhaul, reconstruction according to radiation safety indicators. 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.)]

его ДПР $F_{\text{пр}}$, равного 0,5, согласно п. 6.3 МУ 2.6.1.2838-11¹; при анализе цензурированных слева данных (т.е. содержащих результаты, значение которых составляет менее нижней границы диапазона измерений) использовался метод подстановки LOD/2 [5];

– расчет набора характеристик, описывающих массив данных, и параметров соответствующих распределений (минимальное, максимальное и медианное значения, среднее геометрическое с 95% доверительным интервалом, геометрическое стандартное отклонение, квантили распределения уровня 0,90 и 0,95 и арифметическое среднее), что соответствует рекомендациям Международной комиссии по радиологическим единицам и измерениям (МКРЕ) [6];

– оценку доли результатов измерений (по реальной выборке и ожидаемой из распределения), которая превышает установленный в России (согласно п. 5.3.3 НРБ-99/2009²) норматив среднегодовой ЭРОА изотопов радона для эксплуатируемых жилых и общественных зданий, равный 200 Бк/м³.

Результаты комплексного радиационного обследования

Территория обследованных населенных пунктов характеризуется достаточно ровным полем гамма-излучения; все измеренные значения МАЭД находятся в диапазоне от менее 0,10 до 0,14 мкЗв/ч и с учетом неопределенности результатов измерений не превышают 0,19 мкЗв/ч. Незначительное (на 0,01–0,02 мкЗв/ч) увеличение значений МАЭД гамма-излучения характерно для более крупных населенных пунктов (как правило, районных центров), в которых доля участков с асфальтобетонным покрытием выше, чем в населенных пунктах с меньшей численностью населения и большей долей участков территории с грунтовым покрытием.

Ни в одном из обследованных населенных пунктов не было выявлено превышений показателя МАЭД гамма-излучения на открытой местности уровня 0,3 мкЗв/ч, установленного в качестве гигиенического норматива для участков территорий, отводимых под строительство зданий жилого и общественного назначения в соответствии с ОСПОРБ 99/2010³ и СанПин 2.6.1.2800-10⁴, а также в ка-

честве критерия оценки показателя радиационной безопасности территории, прилегающей к жилым и общественным зданиям в соответствии с МУ 2.6.1.2838-11.

Максимальное измеренное значение МАЭД гамма-излучения в помещениях общественных зданий в обследованных населенных пунктах составляет 0,17 мкЗв/ч и с учетом неопределенности результатов измерений не превышает 0,24 мкЗв/ч; в жилых зданиях максимальное по всем населенным пунктам значение МАЭД гамма-излучения составило 0,16 мкЗв/ч (с учетом неопределенности результатов измерений не превысит 0,22 мкЗв/ч). Ни в одном из обследованных зданий жилого или общественного назначения МАЭД гамма-излучения в помещениях не превышает более чем на 0,3 мкЗв/ч аналогичный показатель для открытой местности на территории населенных пунктов, что в полной мере соответствует требованиям НРБ-99/2009 и СанПин 2.6.1.2800-10 к эксплуатируемым жилым и общественным зданиям и сооружениям.

В рамках выполнения обследования была поставлена задача оценки вклада радона, содержащегося в воде подземных источников, в содержание радона в воздухе помещений и внутреннее ингаляционное облучение населения. При пользовании водой происходит дегазация растворенного в воде радона, и он поступает в воздух помещения. Однако, кроме воды подземных источников водоснабжения, радон и его дочерние продукты распада (ДПР) могут поступать в воздух помещения также и из подстилающих пород под зданием в смеси с почвенным воздухом через отверстия ввода-вывода коммуникаций и трещины в фундаментах, а также из строительных материалов самого здания. Поэтому для оценки вклада радона, поступающего в воздух в процессе пользования водой, в общее содержание радона в воздухе помещения все измерения ЭРОА изотопов радона и ОА радона в воздухе жилых и общественных зданий проводились как в помещениях, связанных с использованием воды (в жилых домах – кухни, ванные; в общественных зданиях – пищеблоки, туалеты, душевые, прачечные, процедурные кабинеты), так и в помещениях, где подвода воды в помещение нет (в жилых домах – спальни, гостиные, детские; в общественных зданиях – учебные помещения, игровые и спальни в детских садах, кабинеты). Использование таких «попарных» изме-

² Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 г. № 47. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 14 августа 2009 г., регистрационный № 14534 (далее – НРБ-99/2009). [Norms of radiation safety (NRB-99/2009). Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2523-09. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 07.07.2009 No. 47. Registered with the Ministry of justice of the Russian Federation on August 14, 2009, registration No. 14534 (hereinafter – NRB-99/2009). (In Russ.)]

³ Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010): Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26.04.2010 г. № 40. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 11 августа 2010 г., регистрационный № 18115. [Basic sanitary rules for the provision of radiation safety (OSPORB 99/2010). Sanitary rules and norms SP 2.6.1.2612-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 26.04.2010 No. 40. Registered with the Ministry of justice of the Russian Federation on August 11, 2010, registration No. 18115. (In Russ.)]

⁴ Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения: Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2800-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 24.12.2010 г. № 171. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 27 января 2011 г., регистрационный № 19587. [Hygienic requirements for limiting public exposure to the natural sources of ionizing radiation. Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2800-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 24.12.2010 No. 171. Registered with the Ministry of justice of the Russian Federation on January 27, 2011, registration No. 19587. (In Russ.)]

рений создавало возможность сравнения полученных результатов и численной оценки вклада радона из воды подземных источников в облучение населения.

Обследование жилых и общественных зданий на содержание радона в воздухе помещений, проведенное в марте – апреле и октябре 2019 г., привело к неожиданным результатам: уровни содержания радона и его ДПР, значительно превышающие установленный в НРБ-99/2009 и СанПин 2.6.1.2800-10 гигиенический норматив по содержанию радона в эксплуатируемых зданиях жилого и общественного назначения (среднегодовая ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений не более 200 Бк/м³), были зарегистрированы в большом числе жилых и общественных помещений, не связанных с потреблением воды, что

свидетельствует об ином основном пути формирования высоких уровней содержания радона в зданиях. Первое же измерение ЭРОА изотопов радона, выполненное с демонстрационной целью (ознакомление сотрудников администрации одного из районов с процедурой и длительностью обследования каждого помещения – в помещении без подвода воды на втором этаже административного здания в условиях повышенного воздухообмена (приоткрытое окно)) показало результат, превышающий значение гигиенического норматива в 1,5 раза.

Результаты комплексного статистического анализа данных о содержании радона в воздухе помещений в каждом из обследованных районов и 2 типах зданий (общественных и жилых) представлены в таблице 2. Гипотеза

Таблица 2

Характеристики массивов значений ОА радона в воздухе помещений и параметры соответствующих распределений

[Table 2

Characteristics of indoor radon concentration datasets and parameters of the corresponding distributions]

Массив [Dataset]	min	max	med	GM (CI95)	GSD	X ₉₀	X ₉₅	AM
Адамовский район [Adamovsky district]								
Общественные здания [Public buildings]	1	2224	170	151 (133 – 172)	3,6	769	1220	285
Жилые здания [Dwellings]	1	2480	228	195 (168 – 227)	3,4	937	1461	343
Домбаровский район [Dombarovsky district]								
Общественные здания [Public buildings]	1	1230	122	113 (93 – 138)	3,4	548	857	200
Жилые здания [Dwellings]	1	1046	193	139 (87 – 220)	4,0	806	1327	251
Кваркенский район [Kvarkensky district]								
Общественные здания [Public buildings]	1	4578	123	102 (89 – 118)	4,0	601	992	219
Жилые здания [Dwellings]	1	1544	130	115 (98 – 134)	3,4	559	875	207
Новоорский район [Novoorsky district]								
Общественные здания [Public buildings]	2	498	108	87 (69 – 109)	2,8	327	475	129
Жилые здания [Dwellings]	1	430	103	80 (62 – 103)	3,2	356	543	128
Светлинский район [Svetlinsky district]								
Общественные здания [Public buildings]	1	674	90	81 (59 – 113)	3,4	386	600	131
Жилые здания [Dwellings]	10	786	82	98 (68 – 140)	2,5	317	442	148
Ясенский ГО [Yasnensky urban okrug]								
Общественные здания [Public buildings]	1	2002	100	82 (66 – 101)	2,8	311	453	135
Жилые здания [Dwellings]	1	656	146	118 (87 – 161)	3,9	670	1095	196

min, max, med – минимальное, максимальное и медианное значения ОА радона в выборке, Бк/м³; GM (CI95) – среднее геометрическое значение ОА радона (в скобках – 95% доверительный интервал), Бк/м³; GSD – геометрическое стандартное отклонение; X₉₀ и X₉₅ – квантили распределения ОА радона уровня 0,90 и 0,95, Бк/м³; AM – среднее арифметическое значение ОА радона, Бк/м³. [min, max, med – minimum, maximum and median values, Bq/m³; GM (CI95) – geometric mean (with 95% confidence interval), Bq/m³; GSD – geometric standard deviation; X₉₀ and X₉₅ – 90th and 95th percentiles, Bq/m³; AM – arithmetic mean, Bq/m³.]

о соответствии результатов измерений логнормальному распределению подтверждается для всех массивов, за исключением жилых зданий в Адамовском районе и общественных зданий в Кваркенском районе, для которых максимальное значение натурального логарифма функции правдоподобия получено для лог-логистических распределений, что не влияет на вывод о том, что робастной мерой центральной тенденции для всех массивов является среднее геометрическое [4]. Поскольку для реальных

выборки характерен чуть более тяжелый правый хвост, медианное значение в подавляющем числе массивов несколько превышает значение среднего геометрического, и именно медиану целесообразно использовать для получения консервативной оценки значения среднегодовой ЭРОА изотопов радона и дальнейшего расчета доз облучения населения.

Далее в таблице 3 представлены результаты оценки среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе жилых

Таблица 3

Результаты оценки среднегодовой ЭРОА изотопов радона в жилых и общественных зданиях в обследованных населенных пунктах

[Table 3]

Estimated annual average radon isotopes EEC in dwellings and public buildings in surveyed settlements]

Населенный пункт [Settlement]	Среднегодовая ЭРОА изотопов радона, Бк/м ³ [Annual average radon isotopes EEC, Bq/m ³]					
	Общественные здания [Public buildings]			Жилые здания [Dwellings]		
	мин [min]	медиана [median]	макс [max]	мин [min]	медиана [median]	макс [max]
Адамовский район [Adamovsky district]						
п. Адамовка [Adamovka]	< 3	24	181	—	—	—
с. Андреевка [Andreevka]	59	197	392	29	121	362
с. Аниховка [Anikhovka]	14	206	768	< 3	253	942
п. Белополье [Belopol'e]	39	142	271	6	49	352
с. Брацлавка [Bratslavka]	7	61	214	< 3	150	987
п. Джарлинский [Dzharlinskiy]	13	54	147	16	110	313
с. Джасай [Dzhasay]	10	110	396	< 3	84	230
п. Жуламансай Zhulamansay]	26	77	158	14	61	277
с. Карабутак [Karabutak]	23	540	1114	23	160	673
п. Мещеряковский [Meshcheryakovskiy]	10	51	244	9	49	112
с. Нижняя Кийма [Nizhnaya Kiyma]	45	137	743	49	174	537
п. Нововинницкое [Novovinnitskoe]	237	451	923	106	240	1242
п. Теренсай [Terensay]	7	62	240	17	90	573
п. Энбекши [Enbekshi]	< 3	13	85	15	70	189
Домбаровский район [Dombarovsky district]						
п. Домбаровский [Dombarovskiy]	< 3	57	450	< 3	58	329
с. Караганда [Karaganda]	253	483	617	23	207	525
Кваркенский район [Kvarkensky district]						
п. Айдырлинский [Aydyrlinskiy]	6	67	347	11	80	385
с. Аландское [Alandskoe]	21	191	872	55	363	774
с. Бриент [Brient]	16	63	280	< 3	38	170
с. Екатериновка [Ekaterinovka]	3	58	518	< 3	52	255
с. Зеленодольск [Zelenodol'sk]	9	160	340	52	95	210
с. Кваркено [Kvarkeno]	7	71	2291	6	94	768
п. Кировск [Kirovsk]	< 3	33	157	6	39	200
п. Красноярский [Krasnoyarskiy]	< 3	66	251	14	48	182
с. Новооренбург [Novoorenburg]	< 3	12	687	22	107	147
с. Приморск [Primorsk]	5	32	332	5	55	137
с. Таналык [Tanalyk]	—	—	—	117	124	130

Населенный пункт [Settlement]	Среднегодовая ЭРОА изотопов радона, Бк/м ³ [Annual average radon isotopes EEC, Bq/m ³]					
	Общественные здания [Public buildings]			Жилые здания [Dwellings]		
	мин [min]	медиана [median]	макс [max]	мин [min]	медиана [median]	макс [max]
Новоорский район [Novoorsky district]						
с. Караганка [Karaganka]	3	63	251	20	33	148
п. Новоорск [Novoorsk]	7	22	50	7	62	217
с. Тасбулак [Tasbulak]	16	109	189	< 3	7	61
Светлинский район [Svetlinsky district]						
п. Актюбинский [Aktyubinskiy]	< 3	38	179	7	59	395
п. Восточный [Vostochnyy]	< 3	62	339	19	42	125
Ясенский ГО [Yasnensky urban okrug]						
с. Верхний Киембай [Verkhniy Kiembay]	—	—	—	36	42	47
с. Еленовка [Elenovka]	< 3	30	76	< 3	54	245
п. Комарово [Komarovo]	7	63	1003	< 3	104	262
с. Котансу [Kotansu]	—	—	—	12	64	136
п. Новосельский [Novosel'skiy]	6	54	246	< 3	96	330

и общественных зданий ($ЭРОА_{ср} = ЭРОА_{рн} + 4,6 \cdot ЭРОА_{тн}$) для каждого из обследованных населенных пунктов (измеренные значения ОА радона пересчитаны в значения ЭРОА радона с использованием коэффициента равновесия $F_{рн} = 0,5$; для консервативности оценки ЭРОА торона при этом принята равной 0,5 Бк/м³, поскольку в ходе проведения экспрессных измерений с использованием радиометров аэрозоль не было получено ни одного значения ЭРОА торона, превышающего нижнюю границу диапазона измерений использованных типов средств измерений – 0,5 Бк/м³).

Превышения гигиенического норматива по содержанию радона в воздухе помещений общественных зданий были зафиксированы в 10 населенных пунктах Адамовского района, 2 населенных пунктах Домбаровского района, 9 населенных пунктах Кваркенского района, 1 населенном пункте Новоорского района, 1 населенном пункте Светлинского района и 2 населенных пунктах Ясенского ГО.

В отдельных населенных пунктах – п. Нововинническое Адамовского района и с. Караганда Домбаровского района – даже минимальная оценка среднегодовой ЭРОА изотопов радона в общественных зданиях превысила гигиенический норматив 200 Бк/м³. Это означает, что результат каждого измерения содержания радона во всех общественных зданиях этих населенных пунктов не соответствует требованиям нормативных документов по радиационной безопасности.

При этом однозначно можно утверждать, что высокие уровни содержания радона в воздухе помещений общественных зданий не связаны с его поступлением из воды в системе водоснабжения: например, максимальное значение ЭРОА изотопов радона, более чем в 10 раз превышающее гигиенический норматив, получено для эксплуатируемого помещения мастерской, расположенного в

подвальном этаже здания, где подвод воды отсутствует как таковой.

В помещениях жилых домов обследованных населенных пунктов превышения гигиенического норматива по содержанию радона в воздухе были зафиксированы в 11 населенных пунктах Адамовского района, 2 населенных пунктах Домбаровского района, 5 населенных пунктах Кваркенского района, 1 населенном пункте Новоорского района, 1 населенном пункте Светлинского района и 3 населенных пунктах Ясенского ГО.

Минимальная оценка среднегодовой ЭРОА изотопов радона в жилых домах ни в одном из населенных пунктов не превысила гигиенический норматив, однако медианное значение для отдельных населенных пунктов превышает 200 Бк/м³ (с. Аниховка – 253 Бк/м³, п. Нововинническое – 240 Бк/м³, с. Караганда – 207 Бк/м³, с. Аландское – 363 Бк/м³).

Максимальные оценки среднегодовой ЭРОА изотопов радона по итогам всех измерений 2019 г. были получены для отдельных жилых домов п. Нововинническое, с. Брацлавка, с. Аниховка Адамовского района (1242, 987 и 942 Бк/м³ соответственно).

Также не прослеживается связь выявленных высоких уровней содержания радона в воздухе помещений жилых домов с использованием в этих помещениях воды: например, в жилом доме в п. Нововинническое оценки среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе на кухне и в гостиной практически не отличаются (1242 и 1199 Бк/м³), а в жилом доме п. Брацлавка по результатам интегральных измерений среднегодовая ЭРОА изотопов радона в гостиной (987 Бк/м³) в 2 раза выше, чем в помещении ванной (437 Бк/м³).

Медианное значение среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений общественных или жилых зданий – это, несомненно, важный показатель, позволяющий оценить тяжесть «радоновой проблемы» в отдель-

ных районах, городских округах и населенных пунктах, но не единственный и не всегда самый выразительный. Представляется, что первостепенную роль при принятии решений о необходимости проведения более масштабных радоновых обследований с целью выявления зданий, в которых требуется осуществление радонозащитных мероприятий в приоритетном порядке, должна играть доля значений среднегодовой ЭРОА изотопов радона, превышающих на определенной территории установленный в России гигиенический норматив для эксплуатируемых жилых и общественных зданий, равный 200 Бк/м³.

Результаты оценки этого показателя представлены в таблице 4. Важный момент состоит в том, что расчет этого показателя на основе результатов уже проведенного обследования (d_{200+}) не всегда отражает реальную ситуацию на обследуемой территории, т.к. это тесно связано с вопросом методически правильного формирования случайной и представительной выборки зданий⁵. В силу определенных организационных ограничений при проведении обследования территориальное распределение

точек измерения носит по сути псевдослучайный характер, в результате чего в выборке может оказываться как неадекватно много зданий с высоким содержанием радона в воздухе, так и неадекватно мало [4]. Альтернативой расчету d_{200+} является определение ожидаемой доли значений среднегодовой ЭРОА изотопов радона выше 200 Бк/м³ (P_{200+}) на основе полученного нормального распределения значений натурального логарифма ОА радона (при этом P_{200+} никогда не может быть равна нулю в силу своего вероятностного характера) [4]. Как видно из таблицы 4, во всех районах и типах зданий, за исключением жилых зданий в Светлинском районе, разница между ожидаемой долей P_{200+} и полученной в конкретной выборке долей d_{200+} является положительной, т.е. в выборку попало недостаточно зданий с высоким содержанием радона в воздухе, хотя абсолютная разница между этими показателями в среднем составляет всего около 3%, что говорит о том, что в большинстве случаев были сформированы достаточно случайные и представительные выборки зданий.

Таблица 4

Результаты оценки доли значений среднегодовой ЭРОА изотопов радона в обследованных районах выше гигиенического норматива 200 Бк/м³

[Table 4]

Estimated fraction of annual average radon isotopes EEC values above the hygienic norm (action level) of 200 Bq/m³ in surveyed districts

Массив [Dataset]	P_{200+} , %	d_{200+} , %
Адамовский район [Adamovsky district]		
Общественные здания [Public buildings]	22,2	19,6
Жилые здания [Dwellings]	27,9	25,5
Домбаровский район [Dombarovsky district]		
Общественные здания [Public buildings]	15,3	12,0
Жилые здания [Dwellings]	22,0	20,6
Кваркенский район [Kvarkensky district]		
Общественные здания [Public buildings]	16,2	12,4
Жилые здания [Dwellings]	15,6	10,5
Новоорский район [Novoorsky district]		
Общественные здания [Public buildings]	7,0	1,3
Жилые здания [Dwellings]	8,4	3,7
Светлинский район [Svetlinsky district]		
Общественные здания [Public buildings]	9,5	1,9
Жилые здания [Dwellings]	6,2	8,0
Ясенский ГО [Yasnensky urban okrug]		
Общественные здания [Public buildings]	6,4	4,2
Жилые здания [Dwellings]	18,4	17,6

P_{200+} – ожидаемая из выбранного распределения доля значений среднегодовой ЭРОА изотопов радона выше 200 Бк/м³; d_{200+} – полученная в выборке доля значений среднегодовой ЭРОА изотопов радона выше 200 Бк/м³.

[P_{200+} – fraction of annual average radon isotopes EEC values above 200 Bq/m³ expected from the fitted distribution; d_{200+} – fraction of annual average radon isotopes EEC values above 200 Bq/m³ calculated from the dataset.]

⁵ Выборочное обследование жилых зданий для оценки доз облучения населения: Методические рекомендации МР 11-2/206-09. Утверждены заместителем Главного государственного санитарного врача Российской Федерации 29.08.2000 г. [Sample survey of residential buildings for assessment of the radiation doses to the population. Guidelines MR 11-2/206-09. Approved by the Deputy Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 29.08.2000. (In Russ.)]

Изначально при планировании комплексного радиационного обследования населенных пунктов восточного Оренбуржья, где ранее были выявлены превышения уровня вмешательства по содержанию радона в воде подземных источников, перед его исполнителями ставилась задача оценки контрольных уровней содержания радона в воде, ниже которых (после перехода газа в воздух) ЭРОА изотопов радона в воздухе помещения не превысит гигиенический норматив. Однако результаты обследования показали, что основная причина высоких уровней содержания радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий не связана с использованием воды подземных источников водоснабжения, и решение поставленной задачи невозможно до тех пор, пока уровни содержания радона в воздухе помещений, обусловленные другими причинами, не будут соответствовать установленным гигиеническим нормативам.

Заключение

Выполненное специалистами ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева совместно с Управлением Роспотребнадзора по Оренбургской области и ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Оренбургской области» комплексное радиационное обследование (включавшее оценку качества питьевой воды по показателям радиационной безопасности [1], оценку параметров внешнего облучения населения и внутреннего облучения за счет ингаляции радона) населенных пунктов 6 районов восточной части Оренбургской области (Адамовского, Домбаровского, Кваркенского, Новоорского, Светлинского районов и Ясненского ГО) выявило, наряду с проблемой повышенных уровней содержания ПРН в воде подземных источников питьевого водоснабжения, не менее серьезную проблему – высокое содержание радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий. Комплексное радиационное обследование показало, что МАЭД гамма-излучения в зданиях и на открытой местности обследованных населенных пунктов в полной мере соответствует требованиям санитарных правил. В то же время обследованием были установлены многочисленные факты превышения гигиенического норматива среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений: в жилых домах – в 23 населенных пунктах, в общественных зданиях – в 25 населенных пунктах.

Проведенное обследование показало, что проблема облучения населения восточных районов Оренбуржья за счет ПИИИ значительно выше, чем исходно предполагалось при планировании работ. И если вопросы обеспечения населения питьевой водой, качество которой по показателям радиационной безопасности соответствует требованиям нормативных документов, к настоящему времени уже практически решены применением аэрационных установок на станциях водоподготовки, то снижение уровней содержания радона в воздухе помещений (даже если рассматривать только общественные здания) представляется более сложной задачей, требующей как выполнения дополнительных исследований, так и значительных финансовых вложений на этапе проведения инженерно-строительных радонозащитных мероприятий.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Кормановская Т.А. разработала дизайн исследования, определила цели и задачи, руководила выполнением полевых исследований, написала черновик рукописи и представила окончательный вариант рукописи для публикации в журнал.

Романович И.К. осуществлял общее научное руководство исследованием, отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Вяльцина Н.Е. организовала проведение полевых исследований на региональном уровне, отредактировала промежуточный вариант рукописи.

Гаевой С.В. организовал проведение полевых исследований на районном уровне, отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Бондарь Л.В. организовал проведение измерений с помощью интегральных трековых детекторов, отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Кононенко Д.В. участвовал в выполнении полевых исследований, провел статистическую обработку результатов измерений, подготовил рисунки и таблицы, английский перевод и отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Сапрыкин К.А. участвовал в выполнении полевых исследований, подготовил описание материалов и методов исследования, отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Кокоулина Е.С. участвовала в выполнении полевых исследований, отредактировала промежуточный вариант рукописи.

Балабина Т.А. провела подготовку и обработку интегральных трековых детекторов, проанализировала результаты интегральных измерений объемной активности радона, отредактировала промежуточный вариант рукописи.

Королева Н.А. провела поиск и анализ литературных данных, отредактировала промежуточный вариант рукописи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов при выполнении работы и подготовки данной статьи.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена в рамках Государственного контракта на проведение научно-исследовательской работы «Комплексное радиационное обследование и гигиеническая оценка уровней облучения населения восточных районов Оренбургской области за счет использования питьевой воды из подземных источников водоснабжения» № 03-21/38 (0853500000319000268) от 9 апреля 2019 г.

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. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-87-97.

2. Из истории освоения целинных и залежных земель в Оренбургской области: сб. док. и матер. Гос. архив Оренб. обл. Оренбург, 1988. 148 с.
3. Кононенко Д.В. Анализ распределений значимой 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.
4. Маренный А.М., Кононенко Д.В., Труфанова А.Е. Радонное обследование в Челябинской области в 2008–2011 гг. Анализ территориальной вариативности объемной активности радона // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 51–67. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-51-67.
5. Кононенко Д.В. Использование метода бета-подстановки для анализа цензурированных данных об объемной активности радона в воздухе помещений // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 4. С. 47–55. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-47-55.
6. Measurement and reporting of radon exposures. ICRU Report No. 88 // Journal of the ICRU 12 (2). Oxford University Press, 2012. 191 p.

Поступила: 11.11.2022 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, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: f4dos@mail.ru

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

Вяльцина Наталья Ефимовна – руководитель Управления Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Оренбургской области, Оренбург, Россия

Гаевой Сергей Васильевич – начальник отдела надзора на транспорте, за условиями труда и радиационной безопасностью Управления Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Оренбургской области, Оренбург, Россия

Бондарь Леонид Владимирович – заведующий отделением факторов производственной среды и радиационной гигиены ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Оренбургской области», Оренбург, 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
ORCID® <https://orcid.org/0000-0002-1392-1226>

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

Кокоулина Елена Сергеевна – 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

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

Королева Надежда Андреевна – старший 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

Для цитирования: Кормановская Т.А., Романович И.К., Вяльцина Н.Е., Гаевой С.В., Бондарь Л.В., Кононенко Д.В., Сапрыкин К.А., Кокоулина Е.С., Балабина Т.А., Королева Н.А. Облучение населения Оренбургской области природными источниками ионизирующего излучения. Часть 1: Результаты комплексного радиационного обследования населенных пунктов восточных районов Оренбургской области // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 1. С. 6–18. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-6-18

Public exposure in the Orenburg region due to natural sources of ionizing radiation. Part 1: Results of the comprehensive survey of settlements in the eastern districts of the Orenburg region

Tatyana A. Kormanovskaya ¹, Ivan K. Romanovich ¹, Natalya E. Vyaltsina ², Sergey V. Gaevoy ², Leonid V. Bondar ³,
Dmitry V. Kononenko ¹, Kirill A. Saprykin ¹, Elena S. Kokoulina ¹, Tatyana A. Balabina ¹, Nadezhda A. Koroleva ¹

¹ 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

² Directorate of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing in the Orenburg region, Orenburg, Russia

³ Center of the Hygiene and Epidemiology in the Orenburg region, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Orenburg, Russia

The paper presents results of a comprehensive radiation survey conducted in 2019 in six districts of the eastern part of the Orenburg region in 37 settlements with previously found elevated levels of activity concentration of natural radionuclides in tap water from groundwater sources of drinking water supply. The survey included measurements of indoor radon concentrations and EEC in residential and public buildings, as well as measurements of ambient dose equivalent rate of gamma radiation indoors and outdoors. The survey revealed that annual average indoor radon EEC in many residential buildings in 23 settlements and public buildings in 25 settlements exceeded the hygienic norm (action level) of 200 Bq/m³ adopted in Russia for existing buildings. The highest values of annual average indoor radon EEC were obtained in residential buildings in Novovinnitskoe (1242 Bq/m³), Bratslavka (987 Bq/m³) and Anikhovka (942 Bq/m³) in Adamovsky district, and in public buildings in Kvarkeno (2291 Bq/m³) in Kvarkensky district, Karabutak (1114 Bq/m³) and Novovinnitskoe (923 Bq/m³) in Adamovsky district. The established hygienic norms in terms of ambient dose equivalent rate indoors and outdoors were not exceeded in the surveyed settlements. Results of the survey showed that the main reason for high indoor radon concentrations in residential and public buildings in the settlements of the eastern part of the Orenburg region is not related to the usage of tap water from groundwater sources of drinking water supply with elevated levels of activity concentration of natural radionuclides.

Key words: natural sources of ionizing radiation, natural radionuclides, radon, progeny, instant measurement, long-term measurement, SSNTD, groundwater sources, drinking water, ambient dose equivalent rate, Orenburg region.

Personal contribution of the authors

Kormanovskaya T.A. developed the design of the survey, defined the goals and objectives, supervised the field research, wrote the draft of the manuscript, and arranged the final version of the manuscript for publication in the journal.

Romanovich I.K. provided general scientific management of the project and edited the interim version of the manuscript.

Vyaltsina N.E. organized field research at the regional level and edited the interim version of the manuscript.

Gaevoy S.V. organized field research at the local level and edited the interim version of the manuscript.

Bondar L.V. organized measurements with solid-state nuclear track detectors and edited an interim version of the manuscript.

Kononenko D.V. participated in the field research, conducted statistical analysis of the results, prepared figures and tables, translated the manuscript and edited the interim version of the manuscript.

Saprykin K.A. participated in the field research, prepared the description of materials and methods, and edited the interim version of the manuscript.

Kokoulina E.S. participated in the field research and edited an interim version of the manuscript.

Balabina T.A. assembled and processed solid-state nuclear track detectors, analyzed the results of long-term measurements of radon concentration, and edited the interim version of the manuscript.

Koroleva N.A. searched and analyzed literature data, and edited the interim version of the manuscript.

Conflict of interest

The authors declare that they have no conflicts of interest when conducting the study and preparing this paper.

Sources of funding

The study was carried out within the framework of the State Contract for conducting research work "Comprehensive radiation survey and hygienic assessment of levels of public exposure in the eastern districts of the Orenburg region due to the use of drinking water from underground water sources" No. 03-21/38 (0853500000319000268).

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

References

1. 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. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-87-97. (In Russian).
2. From the history of the development of virgin and fallow lands in the Orenburg region (collection of documents and materials). Orenburg: State Archive of the Orenburg region; 1988. 148 p. (In Russian).
3. 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).
4. Marennyy AM, Kononenko DV, Trufanova AE. Radon survey in Chelyabinsk Oblast, Russia, in 2008–2011. Analysis of spatial variability of indoor radon concentration. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(3): 51–67. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-51-67. (In Russian).
5. Kononenko DV. Application of the -substitution method for analyzing censored data on indoor radon concentrations. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019; 12(4): 47–55. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-47-55. (In Russian).
6. Measurement and reporting of radon exposures. ICRU Report No. 88. Journal of the ICRU 12 (2). Oxford University Press; 2012. 191 p.

Received: November 11, 2022

For correspondence: Tatyana A. Kormanovskaya – Ph.D. in Biological Sciences, Leading researcher, 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 (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russian Federation; E-mail: f4dos@mail.ru)

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

Natalya E. Vyaltina – Head of the Directorate of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing in the Orenburg region, Chief sanitary doctor of the Orenburg region, Orenburg, Russia

Sergey V. Gaevoy – Head of the Department of the surveillance on transport, working conditions and radiation hygiene, Directorate of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing in the Orenburg region, Orenburg, Russia

Leonid V. Bondar – Head of the radiation hygiene department of the Center of Hygiene and Epidemiology in the Orenburg region, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Orenburg, Russia

Dmitry V. Kononenko – Researcher, 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

ORCID® <https://orcid.org/0000-0002-1392-1226>

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

Elena S. Kokoulina – Leading research engineer, 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, 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

Nadezhda A. Koroleva – Senior researcher, 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: Kormanovskaya T.A., Romanovich I.K., Vyaltina N.E., Gaevoy S.V., Bondar L.V., Kononenko D.V., Saprykin K.A., Kokoulina E.S., Balabina T.A., Koroleva N.A. Public exposure in the Orenburg region due to natural sources of ionizing radiation. Part 1: Results of the comprehensive survey of settlements in the eastern districts of the Orenburg region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 1. P. 6-18. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-6-18

Риск смерти от солидных злокачественных новообразований в Уральской когорте аварийно-облученного населения: 1950–2019

Л.Ю. Крестинина, С.С. Силкин

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

Целью работы является получение прямых оценок риска смерти от солидных злокачественных новообразований у членов Уральской когорты аварийно-облученного населения. Материалы и методы: когорта впервые сформирована в 2018 г. и объединяет всех лиц, облученных на Южном Урале в период с 1950 по 1960 г. на реке Тече и на Восточно-Уральском радиоактивном следе. Объединение лиц, облученных в двух авариях, позволило увеличить число членов когорты до 62,5 тысяч человек, число случаев солидных злокачественных новообразований, включенных в анализ, — до 4511, число человеко-лет под риском — до 1,956 млн, максимальный период наблюдения составил 70 лет. Анализ проводился с использованием регрессионного анализа и простой параметрической модели избыточного относительного риска. Доверительные интервалы с 95% вероятностью рассчитаны с использованием метода максимального правдоподобия. В качестве аналога дозы на мягкие ткани использована доза на желудок, накопленная за весь период наблюдения и рассчитанная в Уральском научно-практическом центре радиационной медицины по усовершенствованной дозиметрической системе 2016 г. Результаты: в результате анализа получена статистически значимая линейная зависимость показателей смертности от солидных злокачественных новообразований от полученной дозы, что подтверждает и уточняет выводы предыдущих работ. Избыточный относительный риск смерти от солидных злокачественных новообразований составил 0,078/100 МГр, $p < 0,001$. Увеличение статистической силы анализа за счет увеличения численности когорты и расширения периода наблюдения позволило получить статистически значимые величины избыточного относительного риска для отдельных групп населения по полу, национальности и другим параметрам, что уточняет полученные ранее оценки, уменьшает неопределенности и позволяет использовать данные для уточнения норм радиационной безопасности населения, подвергающегося облучению в различных ситуациях.

Ключевые слова: Уральская когорта аварийно-облученного населения (УКАОН), река Теча, Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС), радиогенный риск, смертность от солидных злокачественных новообразований, избыточный относительный риск.

Введение

В 1950-е гг. в результате деятельности ПО «Маяк» по производству ядерного плутония произошло загрязнение прибрежных сел реки Течи вследствие сброса радиоактивных отходов в реку Течу и территории Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС) вследствие теплового взрыва в хранилище радиоактивных отходов в 1957 г. Данные события привели к радиоактивному загрязнению больших территорий 3 областей Южного Урала (Челябинской, Курганской и Свердловской) и хроническому облучению населения, проживавшего на загрязненных территориях [1–3]. Для оказания медицинской помощи населению были созданы специальные медицинские учреждения. Сотрудники Уральского научно-практического центра радиационной медицины (УНПЦ РМ) в течение 70 лет оказывают помощь в лечении и обследовании облученного населения, а также занимаются изучением последствий для здоровья облученных лиц [1–4].

Длительное наблюдение позволило сформировать когорту населения, облученного в прибрежных селах на реке Теча (около 30 тыс. человек) [4, 5], а позднее и когорту населения, облученного на территории ВУРС (около 22 тыс. чел.) [1, 3]. Благодаря выработке единых методов наблюдения за облученным населением на Южном Урале и созданию единой дозиметрической системы для расчета индивидуальных доз появилась возможность сформировать когорту, объединяющую лиц, облученных на Южном Урале. В конце 2018 г. в УНПЦ РМ была сформирована Уральская когорта аварийно-облученного населения (УКАОН), объединяющая лиц, получивших облучение в какой-либо из аварий (на реке Теча с 01.01. 1950 г. или на ВУРС с 29.09.1957 г.) при проживании в загрязненных пунктах в период с 01.01.1950 г. по 31.12.1960 г. [6]. Для англоязычной аудитории когорте присвоено название SUPER (South Ural Population exposed in radiation).

Крестинина Людмила Юрьевна

Уральский научно-практический центр радиационной медицины

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

В 2020 г. были опубликованы первые результаты по анализу риска заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями (ЗНО) в УКАОН [7]. В данной работе впервые представлены результаты по анализу риска смерти от солидных ЗНО в данной когорте.

Материалы и методы

Описание когорты

По сравнению с анализом заболеваемости солидными ЗНО [7] данный анализ включает большую численность когорты (62 827 вместо 59 815 человек), расширенную до 2 областей территорию наблюдения (ТН) и расширенный до 70 лет период наблюдения (с 1950 по 2019 г. в сравнении с 1956–2018 гг. при анализе заболеваемости). Данные различия связаны с доступностью

информации о причинах смерти за больший период и на большей территории (включает все районы Челябинской и Курганской областей). Доступность информации о случаях смерти с начала 1950 г. позволила включить в наблюдение всех облученных на реке Тече с 01.01.1950 г. (в отличие от исследования заболеваемости, при котором из анализа были исключены лица, выбывшие с территории наблюдения до 01.01.1956 г., т.к. официальная регистрация случаев заболеваемости ЗНО была доступна только с 01.01.1956 г.). Данные изменения позволили увеличить число человеко-лет под риском для проживавших на территории наблюдения до 1 956 277 человеко-лет.

В таблице 1 представлены демографические и дозовые характеристики членов УКАОН и случаи смерти от солидных ЗНО в указанных группах.

Таблица 1

Демографические характеристики когорты и случаи смерти от ЗНО за 1950–2019 гг.

[Table 1]

Demographic characteristics of the cohort members and cancer mortality cases for 1950–2019]

Характеристики групп когорты [Cohort groups characteristics]	Число человек [Persons number]		Число смертей от солидных ЗНО на территории наблюдения [Solid cancer deaths on the catchment area]	
	N	%	N	%
Вся когорта [Whole cohort]	62 827	100	4511	100
Пол [Sex]				
Мужчины [Male]	27 895	44	2422	54
Женщины [Female]	34 932	56	2089	46
Этнический состав [Ethnicity]				
Русские [Russians]	45 223	72	3243	72
Татары и башкиры [Tatars and Bashkirs]	17 604	28	1268	28
Область начала облучения [Exposure start area]				
Челябинская область [Chelyabinsk Oblast]	47 785	76	3682	82
Курганская область [Kurgan Oblast]	15 042	24	829	18
Причина облучения [Accident of exposure]				
Облучен только на реке Тече [exposed only on the Techa River]	40 841	65	3044	67
Облучен на реке Тече + ВУРС [Exposed on the Techa River+EURT]	2066	3	201	5
Облучен только на ВУРС [only EURT]	19 920	32	1266	28
Возраст на начало облучения, лет [Age at exposure, years old]				
<10	22 259	35	868	19
10–19	10 597	17	850	19
20–29	10 221	16	950	21
30–39	6432	10	650	15
40–49	5336	9	549	12
50–59	3496	6	334	7
60–69	2585	4	208	5
70–79	1486	2	86	2
80>	415	1	16	0
Дозовые группы, Гр (кумулятивная доза на желудок) [Dose groups, Gy (cumulative stomach dose)]				
0 -< 0,010	30 731	49	1840	41

Характеристики групп когорты [Cohort groups characteristics]	Число человек [Persons number]		Число смертей от солидных ЗНО на территории наблюдения [Solid cancer deaths on the catchment area]	
	N	%	N	%
10 – < 0,050	20 835	33	1544	34
0,050 – < 0,100	4926	8	470	10
0,100 – < 0,200	3828	6	371	8
0,200 – < 0,300	961	1	100	2
0,300 – < 0,500	1038	2	121	3
0,500 >	508	1	65	2

Доля женского населения в послевоенном периоде преобладает над долей мужского населения и составляет 56%. Согласно исторически сложившимся условиям, местное население представлено в основном 3 этническими группами: русское население составляет большую долю членов когорты (72%), а татары и башкиры вместе – 28% от всей когорты. Территорией начала облучения для 76% членов когорты являлась Челябинская область, по которой протекала река Теча и где был сформирован Восточно-Уральский след, а также Курганская область, по которой также протекала река Теча и проживало 24% от всех членов УКАОН. Удаленная часть ВУРСа также захватывала частично территорию Свердловской области, на которой в 1957 г. находилось 3 из 22 населенных пунктов ВУРСа, переселенных в связи с вероятностью получения вреда здоровью от облучения по прогнозам ученых. В связи с отсутствием постоянного доступа к информации о причинах смерти и онкологической заболеваемости на территории этой области около 1000 человек (жители сел Тыгиш, Четыркино, Клюкино) были исключены из нашего наблюдения для анализа. Когорта, сформированная в результате объединения населения, облученного в 2 авариях, включала 65% членов, облученных только на реке Тече, и 32% – только на ВУРСе. Лица, облученные в результате 2 аварий, составляли 3%.

В отличие от когорты реки Течи (КРТ), которая ограничена лицами, родившимися до 1950 г., УКАОН включает лиц, как проживавших, так и родившихся на загрязненных территориях в период наибольшего загрязнения (с 1950 по 1960 г.), что увеличивает долю молодых членов когорты и может повлиять на динамику смертности. По данным таблицы 1 можно видеть, что для 35% членов когорты постнатальное облучение началось в возрасте до 10 лет, а в возрасте от 0 до 20 лет эта доля суммарно составляла уже 52%. В возрасте 60 лет и старше на начало облучения в когорте находилось только 7% человек от всего состава. Средний возраст начала облучения для членов когорты составлял 22,8 лет.

Дозы облучения

Население Южного Урала получило хроническое комбинированное облучение: внешнее облучение от загрязненной радионуклидами почвы и внутреннее – за счет поступления радионуклидов с водой и продуктами питания местного производства. Облучение тела человека было неравномерным. Преимущественному облучению под-

вергался красный костный мозг (ККМ) за счет инкорпорации изотопов стронция в костную ткань. Внескелетные ткани облучались более равномерно, и уровни облучения были значительно ниже.

Сотрудниками биофизической лаборатории была разработана единая дозиметрическая система для расчета индивидуальных доз, накопленных в различных органах людей, проживавших на реке Тече и в зоне ВУРСа [8]. Система представляет собой программный комплекс для расчета индивидуальных доз внешнего и внутреннего облучения человека по данным об истории его проживания на загрязненных территориях, с учетом пола и возраста. Расчеты проводятся для 8 радионуклидов (^{90}Sr , ^{89}Sr , ^{137}Cs , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{144}Ce , ^{103}Ru , ^{106}Ru). Система одобрена международными экспертами и постоянно совершенствуется в рамках выполнения отечественных и международных программ. Последние усовершенствования дозиметрической системы привели к разработке TRDS-2016 [9–12]. Индивидуальные дозы для оценки риска от солидных ЗНО в УКАОН были рассчитаны с использованием TRDS-2016. В качестве аналога дозы на мягкие ткани использовалась доза на желудок, которая была близка к уровням облучения большинства других внескелетных тканей.

Вклад внутреннего облучения для членов УКАОН варьировал от 0,3% до 100%, составляя в среднем 45%. Накопление дозы на внескелетные ткани у членов когорты практически прекратилось в 1985 г. Средняя доза, накопленная в стенках желудка за весь период наблюдения, для всех членов когорты составила 43 мГр, медианная – 11 мГр, а максимальная – 1130 мГр.

Доза внутриутробного облучения, которую могла получить небольшая часть (13%) членов когорты, в данном исследовании не учитывалась по ряду причин (ранние исследования не показали увеличения избыточного относительного риска (ИОР) солидных ЗНО в зависимости от внутриутробной дозы, величина ИОР при этом была отрицательной [13], медианная внутриутробная доза среди внутриутробно-облученных в УКАОН была менее 1 мГр, в настоящий момент ведется работа по усовершенствованию расчета внутриутробной дозы). Однако в данном анализе была возможность оценить возможную модификацию эффекта по индикатору для группы внутриутробно облученных.

В таблице 1 можно увидеть, что 90% членов когорты получили дозу до 100 мГр (диапазон низких доз) и только 10 % членов когорты получили дозы в диапазоне

средних доз (от 100 мГр до 1 Гр). Дозу свыше 500 мГр получило всего 508 человек, которые составили 1% от всей когорты. Таким образом, можно отметить, что дозовые характеристики когорты обладают необходимым набором для анализа эффекта малых доз, с небольшим включением более высоких доз для возможности построения регрессионной кривой.

При анализе дозовой зависимости риска смерти от солидных ЗНО использовалась доза с 5-летним лагом, который соответствовал принятому минимальному латентному периоду, необходимому для проявления солидных ЗНО. Это значит, что случаи смерти от солидных ЗНО в течение первых 5 лет после начала облучения при расчете риска попадают в 0 дозовую группу, т.к. предполагается, что ЗНО вызваны любыми причинами, не связанными с дозой. На 6-й год после начала облучения будет считаться, что ЗНО могло быть вызвано дозой за первый год облучения, на 7-й год – дозой, накопленной за первые 2 года облучения, случаи смерти от ЗНО в 2019 г. – дозой, накопленной до 2015 г. и т.д. Средняя доза с учетом минимального латентного периода в 5 лет (т.е. доза, накопленная за 5 лет до даты смерти от ЗНО или конца наблюдения) составила 35 мГр.

Жизненный статус

Источником информации о причинах смерти являются медицинские свидетельства о смерти в Челябинской и Курганской областях, на основе которых в УНПЦ РМ создан регистр причин смерти облученного населения с 1950 г. Поскольку в 1950-е гг. все население проживало в сельских прибрежных пунктах на реке Тече, располагавшихся на территории Каслинского, Кунашакского, Красноармейского и частично Сосновского и Аргаяшского районов, а территория ВУРСа захватывала также Каслинский и Кунашакский районы, то в первые десятилетия, когда миграция населения была ограничена отсутствием паспортов (до 1960-х гг.), информация, собиравшаяся в этих районах, была достаточно полной. В более поздние годы, после индустриализации, миграционные процессы стали более выраженными, и часть членов когорты уже выезжала с наблюдаемых территорий и не могла быть прослежена. В связи с этим территория наблюдения за населением для анализа смертности была расширена до 2 областей (Челябинской и Курганской). В таблице 2 представлен жизненный статус членов когорты к концу 2019 г. Можно видеть, что за весь период наблюдения 11,5 тысяч человек (18% от всей УКАОН) мигрировали с ТН за пределы Челябинской и Курганской областей. Информация об их жизненном статусе после миграции для нас недоступна, поэтому после даты миграции они исключаются из анализа. Известно, что к концу 2019 г. на ТН проживают более 11 000 человек (22% от немигрантов), умерло среди немигрантов за весь период более 34 000 человек, которые составили 67% членов когорты. Более 5 тысяч человек (11% от немигрантов) были потеряны на ТН за весь период наблюдения. Среди умерших на ТН причина смерти известна для 91%, что является удовлетворительным показателем для длительного периода наблюдения. Необходимо отметить, что на начало наблюдения (у каждого человека своя дата в период с 1950 по 1960 г.) все члены когорты включены в анализ и вносят свой вклад в расчет человеко-лет и случаев ЗНО до конца

периода наблюдения или до даты выбытия с территории наблюдения по разным причинам (смерть, миграция, потеря из наблюдения). К концу наблюдения 17 399 человек, или 27,6% от 62 827 (11 591 мигрант + 5808 потерянных из наблюдения) уже вышли из анализа. Доля выбывших может уменьшать статистическую силу анализа, но не должна вызывать значимого смещения при оценке риска, т.к. точная дата выбытия позволяет исключить человека из анализа как для подсчета человеко-лет, так и для случаев ЗНО в конкретной дозовой категории в конкретный календарный период.

Таблица 2

Жизненный статус членов УКАОН к 31.12.2019 г.

[Table 2]

Vital status of SUPER cohort members as of 31.12.2019]

Жизненный статус на 31.12.2019 г. [Vital status of 31.12.2019]	Человек [Persons]	
	n	%
Жив [Alive]	11 009	22
Умерло всего [Total died]	34 419	67
причина смерти известна [Cause of death is known]	31 361	91
причина смерти не известна [Cause of death unknown]	3058	9
Потерянные из наблюдения [Lost from follow-up]	5808	11
Всего на ТН* к 31.12.2019 г. [Total persons on the CA]	51 236	100
Мигранты с ТН [Migrants out of CA*]	11 591	18
Всего [Total]	62 827	100

*ТН – территория наблюдения [*CA – catchment area].

В таблице 3 представлено распределение причин смерти по классам международной классификации болезней 9 пересмотра (МКБ-9) среди умерших лиц с известной причиной за весь период наблюдения. За это время произошло несколько пересмотров классификаций кодирования причин смерти (с МКБ-7 по МКБ-11), мы используем классификацию 9 пересмотра, распространенную в середине периода наблюдения.

Наиболее частыми причинами смерти (51%) являются заболевания сердечно-сосудистой системы, на втором месте (15,3%) – смерти от новообразований, на третьем месте – травмы, несчастные случаи и отравления. Эти причины отражают общие тенденции причин смерти для всего взрослого населения [14], несмотря на то, что включают большой период наблюдения, в течение которого могли происходить различные колебания. У женщин третье место по частоте причин смерти (6,7%) занимают заболевания органов дыхания, потеснив причины смерти от травм и отравлений на четвертое место (4,8%).

Более высокая доля внешних причин смерти (XVII класс МКБ-9) у мужчин относительно женщин является ожидаемой, так же, как и более высокие показатели смертности от ЗНО у мужчин являются общемировой тенденцией [15–16].

В таблице 4 представлена структура причин смерти от ЗНО у членов УКАОН за весь период наблюдения.

Структура причин смерти согласно МКБ-9 на ТНС за период с 1950 по 2019 г.

Таблица 3

Cause of death structure by ICD-9 for 1950–2019 on the CA]

[Table 3

Болезни, МКБ-9 [Diseases, ICD-9]	Мужчины [Males]		Женщины [Females]		Всего [Total]	
	n	%	n	%	n	%
I. Инфекционные [Infection]	688	4,5	408	2,6	1096	3,5
II. Новообразования [Neoplasms]	2567	16,7	2233	13,9	4800	15,3
III. Эндокринной, иммунной систем, расстройства питания [Endocrine, metabolic and immune disorders]	136	0,9	272	1,7	408	1,3
IV. Крови и кроветворных органов [Blood and hematopoietic organs]	11	0,1	15	0,1	26	0,1
V. Психические расстройства [Mental disorders]	73	0,5	77	0,5	150	0,5
VI. Нервной системы и органов чувств [Nervous system and sense organs]	197	1,3	226	1,4	423	1,3
VII. Системы кровообращения [Circulatory system]	6607	43,1	9452	59,0	16 059	51,2
VIII. Органов дыхания [Respiratory system]	1467	9,5	1079	6,7	2546	8,1
IX. Органов пищеварения [Digestive system]	432	2,8	422	2,6	854	2,7
X. Мочеполовой системы [Genitourinary system]	150	1,0	151	1,0	301	1,0
XI. Осложнения беременности, родов и послеродового периода [Complications of pregnancy, childbirth and puerperium]	0	0,0	38	0,2	38	0,1
XII. Кожы и подкожной клетчатки [Skin and subcutaneous tissue]	7	0,0	15	0,1	22	0,1
XIII. Костно-мышечной системы и соединительной ткани [Musculoskeletal system and connective tissue]	22	0,1	45	0,3	67	0,2
XIV. Врожденные аномалии [Congenital anomalies]	30	0,2	31	0,2	61	0,2
XV. Состояния перинатального периода [Conditions of the perinatal period]	46	0,3	36	0,2	82	0,3
XVI. Симптомы, признаки, отклонения от нормы [Symptoms and ill-defined conditions]	426	2,8	752	4,7	1178	3,7
XVII. Травмы, отравления и другие внешние причины [Injuries, poisoning and other external causes]	2482	16,2	768	4,8	3250	10,4
Всего случаев смерти с известной причиной на территории наблюдения [Total deaths with known cause on the catchment area]	15 341	100,0	16 020	100,0	31 361	100,0
%	48,9		51,1		100,0	

Жирным шрифтом выделены наиболее частые причины смерти [The most common causes of death are in bold].

Распределение случаев смерти от новообразований в УКАОН по полу и по рубрикам МКБ-9

Таблица 4

Cancer death distribution in SUPER cohort by gender and ICD-9 three-digit categories]

[Table 4

Локализация новообразований (рубрика МКБ-9) [Malignancies sites (ICD-9 three-digit categories)]	Мужчины [male]		Женщины [female]		Всего [Total]	
	N	%	N	%	N	%
Губа, ротовая полость и глотка [Lips, oral cavity and pharynx] (140–149)	75	3	17	1	92	2
Пищевод [Esophagus] (150)	129	5	95	4	224	5
Желудок [Stomach] (151)	468	18	424	19	892	19
Кишечник, другие отделы брюшной полости [Intestine, colon, rectum, other parts of the abdominal cavity] (152–154, 158–159)	212	8	263	12	475	10
Печень, поджелудочная железа [Liver, pancreas] (155–157)	161	6	192	9	353	7

Локализация новообразований (рубрика МКБ-9) [Malignancies sites (ICD-9 three-digit categories)]	Мужчины [male]		Женщины [female]		Всего [Total]	
	N	%	N	%	N	%
Нос, гортань [Nose, larynx] (160–161)	78	3	7	0	85	2
Трахея, бронхи и легкое [Trachea, bronchi, lung] (162)	797	31	108	5	905	19
Плевра и другие органы грудной клетки [Pleura, heart and other chest organs] (163–165)	6	0	5	0	11	0
Кости и соединительная ткань [Bones and connective tissue] (170–171)	31	1	32	1	63	1
Кожа (не меланома) [Nonmelanoma skin] (172)	14	1	18	1	32	1
Меланома [Melanoma] (173)	15	1	15	1	30	1
Молочная железа [Breast] (174, 175)	3	0	190	9	193	4
Тело и неуточненные отделы матки [Body of uterus, unspecified parts of the uterus] (179, 182)	0	0	195	9	195	4
Шейки матки [cervix uteri] (180)	0	0	163	7	163	3
Другие женские половые органы [Other female genital organs] (183–184)	0	0	132	6	132	3
Мужские половые органы [Male genital organs] (185–187)	113	4	0	0	113	2
Мочевой пузырь и другие органы мочевой системы [Bladder and other organs of the urinary system] (188–189)	157	6	51	2	208	4
Глаза, головной мозг и другие отделы ЦНС [Eye, brain, other parts of nervous system] (190–192, 239.6)	54	2	56	3	144	3
Щитовидная железа [Thyroid] (193)	7	0	14	1	21	0
Другие эндокринные железы [Other endocrine glands] (194)	1	0	5	0	6	0
Другие и неуточненные локализации [Other unspecified sites] (195–199)	101	4	107	5	208	4
Все солидные злокачественные новообразования [All solid cancer] (140–199, 239.6)	2422	94	2089	94	4511	94
Лимфогранулематоз, лимфомы, миелома [Hodgkin's diseases, lymphomas, myeloma] (200–203)	41	2	47	2	88	2
Лейкозы [Leukaemia] (204–208)	70	3	68	3	138	3
Доброкачественные новообразования [Benign neoplasms] (210–229)	9	0	11	0	20	0
Новообразования <i>in situ</i> и неуточненной природы [in situ neoplasms and neoplasms of unspecified nature 230–239 (без 239.6)]	25	1	18	1	43	1
Всего [Total]	2567	100	2233	100	4800	100

За весь период наибольшее число случаев смерти (905) наблюдается от ЗНО легкого, что составляет 19% от всех ЗНО. Такую же долю занимают смерти от ЗНО желудка с немного меньшим количеством случаев (892 случая). Следующая локализация в УКАОН по частоте – ЗНО кишечника и других отделов брюшной полости (475 случаев, 10%), затем идут ЗНО печени и поджелудочной железы (353 случая, 7%) и ЗНО пищевода (224 случая, 5%).

Статистические методы

Анализ риска смерти от ЗНО проводился с использованием простой параметрической модели избыточного относительного риска (ИОР) на основе Пуассоновской регрессии программами Datab и Amfit статистического пакета EPICURE [17]. Модель ИОР представлена формулой:

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

где:

$\lambda(a, d, z)$ – общий риск смерти от ЗНО в зависимости от достигнутого возраста (a), дозы (d) и других факторов (z);
 z_0 – другие факторы, которые могут влиять на базовые уровни (λ_0),

z_i – факторы, которые могут модифицировать ИОР.

Избыточный риск описывается как произведение функции дозового ответа $p(d)$ на функцию модификации эффекта ($\varepsilon(z_i)$).

С использованием программы DATAB были созданы таблицы человеко-лет и случаев ЗНО со стратификацией по полу, национальности (русские, татары и башкиры), факту эвакуации, территории наблюдения, календарному периоду (14 категорий по 5 лет с 1950 по 2019 г.), дозовым категориям с начальным значением (0, 2, 10, 25, 50, 100, 250, 500 и более мГр), достигнутому возрасту (7 категорий по 10 лет, от 0 до 60 лет и старше), возрасту на начало

облучения (по 10 лет от 0 до 60 лет), времени после облучения (по 5 лет от 0 до 50 лет и больше).

Указанные категории при необходимости можно объединять в более крупные категории. Например, чтобы оценить влияние календарного периода на базовые уровни, были созданы варианты периодов по 2 категории вместо 15 и оценена разница показателей в нескольких вариантах (например, период до 1975 г. и после, период до 1985 г. и после; период до 1995 г. и после). В результате был выбран первый вариант как наиболее статистически значимый.

Стандартные фоновые или национальные уровни смертности в нашем случае использовать некорректно в связи с возрастными ограничениями членов когорты в разные периоды. Поэтому базовый уровень риска смерти в данном анализе – это подогнанная модель фона, полученная экстраполяционным методом (статистически) с помощью программы Amfit [17]. Программа Amfit позволяет провести многофакторный анализ и учесть все доступные для анализа факторы, влияющие на показатели смертности, присущие данной когорте независимо от дозы (базовые уровни) и зависящие от дозы (избыточный относительный риск).

Статистическая значимость показателей и доверительные интервалы определялись методом максимального правдоподобия с 95% вероятностью.

Результаты анализа риска смерти от солидных ЗНО

Расчет базовых уровней с использованием программы Amfit

На первом этапе анализа с помощью программы Amfit были рассчитаны базовые уровни смерти от солидных ЗНО и была оценена статистическая значимость влияния на них каждого из доступных параметров при включении их в модель в различных сочетаниях. В результате тестирования было выбрано следующее сочетание параметров, оказывающих статистически значимое влияние на уровни смертности от солидных ЗНО: пол ($p < 0,001$), национальность ($p < 0,001$), факт эвакуации ($p < 0,001$), год рождения когорты (до 1925 или после) ($p < 0,001$), период наблюдения (до 1975 г. и после), достигнутый возраст, связанный с полом ($p < 0,001$). При одновременном включении этих факторов в модель были получены следующие

особенности базовых уровней смертности в данной когорте: показатели у женщин были ниже, чем у мужчин; у русских выше, чем у татар и башкир; у переселявшихся лиц выше, чем у непереселявшихся; у родившихся после 1925 г. выше, чем у родившихся ранее 1925 г.; в период после 1975 г. показатели уменьшались; при достижении 70 лет как у мужчин, так и у женщин показатели смертности увеличивались в степенной зависимости. Таким образом, с помощью программы Amfit были выбраны факторы, оказывающие значимое влияние на уровни смертности в УКАОН, и рассчитаны базовые уровни смерти от солидных ЗНО для дальнейшего расчета ИОР.

Дозовая зависимость

Для анализа дозовой зависимости в программе Amfit были протестированы линейная, линейно-квадратичная и квадратичные модели. Зависимость ИОР от поглощенной дозы хорошо описывалась линейной моделью и была статистически значима. Величина ИОР смерти для всех солидных ЗНО с 5-летним минимальным латентным периодом составила 0,078/100 мГр, 95% ДИ: 0,037–0,124; $p < 0,001$. Информационный критерий Акаике (AIC) для линейной модели составил 18826,95 (AIC – применяется для выбора из нескольких статистических моделей, зависит от числа параметров в модели и вычисляется с применением функции правдоподобия. Чем меньше значение критерия, тем лучше модель [18]).

Добавление квадратичного компонента к линейному не улучшало модель ($p > 0,5$). Оценка ИОР с использованием квадратичной модели составила 0,014/100 мГр, 95% ДИ: 0,006–0,023, $p < 0,001$, AIC=18830,023. При этом линейная модель лучше описывала ИОР и являлась более обоснованной при анализе эффектов малых доз.

Также протестировано влияние минимального латентного периода на величину и значимость ИОР, оценены показатели при 0, 2-, 5- и 10-летнем периодах (табл. 5).

Можно видеть, что точечные оценки ИОР в дозовых группах вместе с вертикальными линиями доверительных интервалов и горизонтальными пунктирными линиями, указывающими стандартное отклонение среднегрупповых доз, полностью лежат внутри области между доверительными интервалами линейной модели. Кривая квадратичной модели также лежит внутри области между доверительными интервалами линейной модели, что

Величины ИОР в зависимости от минимального латентного периода

Таблица 5

[Table 5]

ERR values depending on the minimum latent period]

Минимальный латентный период, лет [Minimal latent period, years]	ИОР/100 мГр [ERR/100 mGy]	P	Доверительный интервал, 95% [Confidence interval]		Избыточные ЗНО [Excess cancers]	AIC*
			нижний [lower]	верхний [upper]		
0	0,081	<0,001	0,040	0,126	160,69	18 825,563
2	0,081	<0,001	0,040	0,127	158,9	18 825,488
5	0,078	<0,001	0,037	0,124	148,77	18 826,947
10	0,064	0,001	0,024	0,108	115,53	18 831,959

*AIC – информационный критерий Акаике, для выбора моделей.
[*AIC is the Akaike Information Criterion for model selection].

подтверждает, что в области доз ниже 1 Гр дозовая зависимость ИОР хорошо описывается линейной моделью.

Для наглядности линейная и квадратичная модели и оценки ИОР в дозовых группах вместе с доверительными интервалами представлены на рисунке.

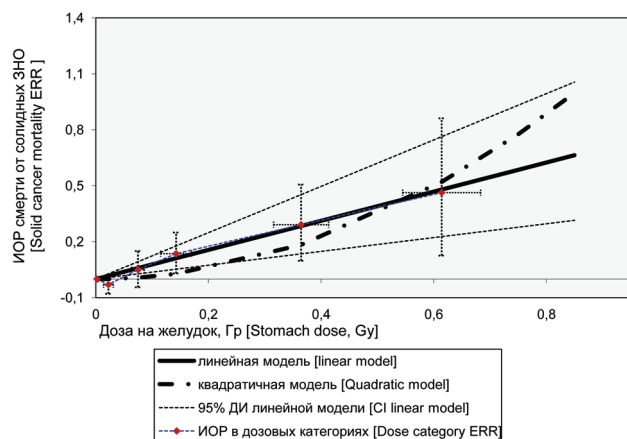


Рис. Дозовая зависимость ИОР смерти от солидных ЗНО в УКАОН

[Fig. Dose dependence of solid cancer mortality ERR in the SUPER cohort]

Можно видеть, что точечные оценки ИОР в дозовых группах вместе с вертикальными линиями доверительных интервалов и горизонтальными пунктирными линиями, указывающими стандартное отклонение среднegrupповых доз, полностью лежат внутри области между доверительными интервалами линейной модели. Кривая квадратичной модели также лежит внутри области между доверительными интервалами линейной модели, что подтверждает, что в области доз ниже 1 Гр дозовая зависимость ИОР хорошо описывается линейной моделью.

Распределение случаев смерти от солидных ЗНО, человеко-лет и атрибутивного риска по дозовым группам,

рассчитанное на основе линейной модели с 5-летним минимальным латентным периодом, представлено в таблице 6.

Атрибутивный риск рассчитан по модельным данным и представляет долю избыточных случаев ЗНО относительно суммы избыточных и базовых случаев, рассчитанных по модели. Можно видеть, что, согласно величине атрибутивного риска, у членов когорты в наибольшей дозовой группе, превышающей 500 мГр, дополнительные случаи ЗНО, связанные с облучением, могут составить до 32%. А всего за 70-летний период наблюдения среди более 62 тысяч членов когорты 149 человек могут умереть от солидных ЗНО из-за облучения.

Модификация дозового ответа

Программа Amfit позволяет оценить величину дозовой зависимости в отдельных группах когорты, объединенных по какому-либо признаку, и таким образом оценить возможную модификацию дозового ответа от различных факторов. В таблице 7 представлены оценки ИОР у разных групп членов когорты.

Увеличение статистической силы исследования позволило получить статистически значимые значения ИОР не только для всей когорты, но и для отдельных групп, что позволяет провести их корректное сравнение. В частности, положительный дозовый ответ был получен как у мужчин, так и у женщин, как у русского населения, так и у татар башкир, у облученных в возрасте 10 лет и 40 лет, при этом различия между ними не являются достоверными.

Обсуждение

До настоящего времени исследования по изучению эффектов малых доз сохраняют большие неопределенности. Невысокая статистическая сила таких исследований связана именно с малыми величинами доз и должна компенсироваться большой численностью исследуемых групп или высокой частотой исследуемого события для получения значимых результатов.

Таблица 6

Распределение случаев смерти от солидных ЗНО, человеко-лет и атрибутивного риска по дозовым группам в УКАОН

[Table 6]

Distribution of solid cancer deaths, person-years and attributive risk by dose groups in the SUPER cohort]

Дозовые группы, мГр [Dose groups, mGy]	Случаи смерти от солидных ЗНО [Solid cancers death cases]	Человеко-годы [Person-years]	Случаи смерти от солидных ЗНО по линейной модели [Solid cancer death cases based on linear model]		
			Избыточные [Excess]	Базовые [Background]	Атрибутивный риск, % [Attributable risk, %]
0	208	246 576	0,0	202,8	0,0
0–2	1015	487 195	0,6	964,4	0,1
2–	773	322 484	3,0	761,0	0,4
10–	967	359 678	13,3	1017,4	1,3
25–	471	173 336	12,2	464,6	2,5
50–	450	166 663	25,0	428,5	5,5
100–	412	141 913	40,3	362,6	10,0
250–	154	44 448	34,5	119,2	22,4
500 мГр >	61	13 984	19,9	41,7	32,2
Вся когорта [Whole cohort]	4511	1 956 277	148,8	4362,2	3,3

Модификация ИОР смерти от солидных ЗНО нерадиационными факторами в аналитической УКАОН
ERR modification of solid cancer deaths by non-radiation factors in the analytical SUPER cohort]

Таблица 7

[Table 7

Характеристики групп когорты [cohort groups characteristics]	ИОР/100 мГр* [ERR/100 mGy]	Доверительный интервал, 95% [Confidence interval, 95%]		Р
		нижняя граница [lower bound]	верхняя граница, [upper bound]	
Вся когорта [Whole cohort]	0,078	0,037	0,124	<0,001
Пол [Sex]				
Мужчины [Male]	0,061	0,0096	0,121	0,03
Женщины [Female]	0,095	0,039	0,162	0,002
Этническая принадлежность [Ethnicity]				
Тюрки [Turks]	0,126	0,046	0,219	<0,004
Славяне [Slavs]	0,062	0,018	0,113	0,01
Факт переселения [Resettlement fact]				
Переселенные [Resettled]	0,081	0,037	0,130	<0,001
Непереселенные [Residents]	0,055	-0,071	0,198	0,44
Возраст начала облучения [Age at exposure]				
10 лет [10 years]	0,076	0,030	0,131	0,005
40 лет [40 years]	0,080	0,032	0,134	0,003
Достигнутый возраст [Attained age]				
30 лет [30 years]	0,034	0,007	0,099	0,39
70 лет [70 years]	0,089	0,046	0,139	<0,001
Причина/авария облучения [Accident of Exposure]				
Только река Теча [Techa River only] (n=40841)	0,095	0,037	0,160	0,002
Только ВУРС [EURT only] (n=19920)	0,224	-0,070	0,490	0,073
Обе аварии [both accident] (n=2066)	0,069	0,020	0,126	0,011
Вся когорта реки Теча [Total TRC, including exposed in both accidents]	0,064	0,048	0,080	<0,001
Вся когорта ВУРСa [total EURTC, including exposed in both accidents]	0,055	0,010	0,107	0,02
Календарный период [Calendar period]				
1956–1974	0,042	-0,026	0,125	0,277
1975–2019	0,090	0,043	0,144	<0,001

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

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

Создание объединенной когорты лиц, облученных на Южном Урале в 2 радиационных ситуациях, а также увеличение периода наблюдения, приводящее к увеличению числа человеко-лет под риском, создали предпосылки для увеличения статистической силы исследования и уменьшения предыдущих неопределенностей в величинах риска, в частности, для смерти от солидных ЗНО. Численность когорты для анализа увеличилась почти вдвое и составила более 62 тысяч человек, число человеко-лет за 70-летний период составило 1,96 млн,

а число смертей от солидных ЗНО достигло 4,5 тысяч. Дозы на желудок, накопленные за весь период наблюдения, использованные для анализа, были рассчитаны на основе усовершенствованной системы расчета доз TRDS-2016. Величина риска смерти от солидных ЗНО за многолетний период в УКАОН изменилась незначительно относительно предыдущих оценок ИОР и составила 0,078/100 мГр, 95% ДИ: 0,037–0,124), но при этом сама величина не уменьшилась, несмотря на увеличение периода наблюдения. Для сравнения у членов когорты реки

Течи ИОР был 0,06/100 мГр (95% ДИ: 0,004–0,13) за 58 лет наблюдения, а у членов КВУРС – 0,06; 95% ДИ: 0,001–0,13 за 50 лет наблюдения [19]. В настоящем исследовании также заметно уменьшилась неопределенность точечной оценки ИОР: диапазон между границами доверительного интервала ИОР для членов УКАОН уменьшился в 1,5 раза относительно предыдущих оценок и составил 0,087 (в КРТ диапазон был 0,126, а в КВУРС – 0,129).

Кроме того, в текущем анализе были получены статистически значимые оценки ИОР в отдельных группах когорты по полу, национальности, возрасту начала облучения, что позволило провести сравнение величин риска внутри групп (см. табл. 7). Например, в ранних анализах дозового ответа наблюдалась тенденция увеличения ИОР с увеличением возраста начала облучения (при этом величины ИОР в возрастных группах были недостоверны), что не наблюдалось в японской когорте LSS [20] и было трудно объяснимо. В настоящем исследовании величины ИОР у лиц, начавших облучение в возрасте 10 лет и 40 лет, являются достоверными и не имеют различий. При оценке влияния достигнутого возраста на дозовый ответ отсутствие достоверной оценки ИОР для лиц, достигших 30-летнего возраста, не позволяет корректно сравнить этот показатель с аналогичным в группе достигших 70-летнего возраста. Кроме того, получены статистически значимые оценки ИОР не только для женщин и татар и башкир, как в ранних исследованиях, но также и для мужчин, и для русского населения, что позволяет увидеть отсутствие достоверных отличий (доверительные интервалы перекрываются) в группах по полу и разной национальности.

Как уже отмечалось, при описании характеристик УКАОН, объединяющей облученных на реке Тече и на ВУРСе, часть членов КРТ были переселены на территории, которые в 1957 г. попали под радиоактивное облако на ВУРС. В результате более 2000 человек были облучены сразу в 2 авариях. Поэтому в таблице 7 приведены значения ИОР для лиц, облученных в различных ситуациях: 1) только на реке Тече; 2) только на ВУРСе; 3) в 2 авариях; 4) для всех облученных на реке (включая получивших дополнительное облучение на ВУРСе); 5) для всех облученных на ВУРСе, включая облученных дополнительно на реке. Можно видеть, что величины риска являются значимыми и достаточно близкими в 4 случаях из 5 групп. Только в группе № 2 (при облучении только на ВУРСе) величина риска является статистически незначимой и с большими неопределенностями, так как имеет очень большой диапазон между границами доверительного интервала, который в 4 раза выше, чем в остальных группах. Это связано с более низкими дозами облучения на ВУРСе, которые снижают статистическую силу показателя, когда группа имеет небольшую численность. Объединение лиц, облученных на ВУРСе и реке Тече в одну когорту, позволяет усилить точность расчетов в низко-дозовом сегменте и уменьшает неопределенность, наблюдаемую в отдельных группах.

Также проводилась попытка определить возможное влияние факта внутриутробного облучения части членов когорты на величину риска смерти от солидных ЗНО. Величина ИОР с индикатором в группе внутриутробно облученных была отрицательна и незначима, $p > 0,5$, в таблице не приводится из-за малой информативности.

Заключение

Впервые получены прямые оценки ИОР риска смерти от солидных ЗНО в УКАОН (объединяющей лиц, облученных на Южном Урале в 2 авариях и облученных в диапазоне доз ниже 1 Гр) за период наблюдения до 70 лет. ИОР/100 мГр составил 0,078 (95% ДИ: 0,037; 0,124), $p < 0,001$.

Дозовый ответ наилучшим образом описывает линейной модель.

Величина ИОР смерти от солидных ЗНО в объединенной когорте даже через 70 лет после облучения сохраняется положительной и по сравнению с предыдущими результатами в отдельных когортах КРТ и КВУРС показывает сопоставимые величины.

Увеличение когорты и периода наблюдения привело к уменьшению неопределенностей в величине ИОР относительно оценок в разных когортах, и диапазон доверительного интервала уменьшился в 1,5 раза.

Увеличение статистической силы исследования позволило получить достоверные оценки ИОР в отдельных группах когорты: для лиц разного пола, национальности, разного возраста на начало облучения, периода наблюдения и др. (многие из которых ранее были статистически недостоверны и трудно сопоставимы), что позволяет проводить сравнение показателей в отдельных группах населения и дополняет информацию, необходимую для решения вопросов при выработке норм радиационной защиты для отдельных групп населения при облучении в диапазоне доз ниже 1 Гр.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Крестинина Л.Ю. – анализ риска, дизайн статьи, написание статьи.

Силкин С.С. – подготовка данных к анализу, обсуждение результатов, редактирование статьи.

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, долгие годы возглавляемому к.техн.н. М.О. Дегтевой, за предоставленные оценки доз, и коллективу отдела Базы данных «Человек» под руководством Н.В. Старцева за обновленные данные регистров медико-дозиметрической базы данных УНПЦ РМ, а также коллективу эпидемиологической лаборатории за подготовку данных к анализу.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального медико-биологического агентства России, в рамках реализации федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года».

Литература

1. Аклеев А.В., Косенко М.М., Крестинина Л.Ю., и др. Здоровье населения, проживающего на радиоактивных

- территориях Уральского региона. М.: РАДЭКОН, 2001. 194 с.
2. Последствия техногенного радиационного воздействия и проблемы реабилитации Уральского региона. Под ред. С.К. Шойгу. М.: Комтехпринт, 2002. 287 с.
3. Экологические и медицинские последствия радиационной аварии 1957 года на ПО «Маяк». Под ред. А.В. Акеева, М.Ф. Киселева. М.: ФУ «Медбиоэкстрем» при Минздраве РФ», 2001. 294 с.
4. Крестинина Л.Ю., Акеев А.В. Отдаленные соматико-стохастические эффекты. Под ред. А.В. Акеева. Последствия радиоактивного загрязнения реки Течи. Челябинск: «Книга», 2016. гл. 9. С. 270-330.
5. Kossenko M.M., Thomas T.L., Akleyev A.V., et al. The Techa River Cohort: Study Design and Follow-up Methods // Radiation Research. 2005. Vol. 164. P. 591-601.
6. Силкин С.С., Крестинина Л.Ю., Старцев Н.В., Акеев А.В. Уральская когорта аварийно-облученного населения // Медицина экстремальных ситуаций. 2019. № 3. С. 393-402.
7. Крестинина Л.Ю., Силкин С.С., Микрюкова Л.Д., и др. Риск заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями в Уральской когорте аварийно-облученного населения: 1956-2017 // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 6-17. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-6-17.
8. Дегтева М.О., Толстых Е.И., Воробьева М.И., и др. Дозиметрическая система реки Теча: настоящее и будущее // Вопросы радиационной безопасности. 2006. № 1. С. 81-95.
9. Tolstykh E.I., Peremyslova L.M., Degteva M.O., Napier B.A. Reconstruction of radionuclide intakes for the residents of East Urals Radioactive Trace (1957-2011) // Radiation and Environmental Biophysics. 2017. Vol. 56, № 1. P. 17-45. DOI 10.1007/s00411-016-0677-y.
10. Tolstykh E.I., Degteva M.O., Peremyslova L.M., et al. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: Strontium-90. // Health Physics. 2011. Vol. 101, № 1. P. 28-47.
11. Tolstykh E.I., Degteva M.O., Peremyslova L.M., et al. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: ^{137}Cs // Health Physics. 2013. Vol. 104, № 5. P. 481-498.
12. 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, № 4. P. 378-387.
13. Krestinina L.Yu., Kharyuzov Yu. E., Epifanova S.B., et al. Cancer incidence after in utero exposure to ionizing radiation in Techa River Residents // Radiation Research. 2017. Vol. 188, P. 314-324. DOI 10.1667/RR14695.1.
14. World Health Organization. Global Health Observatory. Geneva: World Health Organization. 2018. P. 45-48.
15. Злокачественные новообразования в России в 2011 году (заболеваемость и смертность). Под ред. В.И. Чиссова, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М.: ФГБУ «МНИОИ им. П.А. Герцена» Минздрава России, 2013. С. 46-47.
16. Ferlay J., Colombet M., Soerjomataram I., et al. Global and Regional Estimates of the Incidence and Mortality for 38 Cancers: GLOBOCAN 2018. Lyon: International Agency for Research on Cancer: World Health Organization. 2018. P. 33-39.
17. Preston D.L., Lubin J., Pierce D., McConney. Epicure Users Guide. Seattle, Washington: Hirosoft International Company, 1993.
18. Akaike H. A new look at the statistical model identification // IEEE Transactions on Automatic Control. December 1974. 19 (6). P. 716-723. DOI: 10.1109/TAC.1974.1100705.
19. Крестинина Л.Ю., Силкин С.С., Микрюкова Л.Д., и др. Сравнительный анализ риска смерти от солидных злокачественных новообразований у населения, облучившегося на реке Теча и Восточно-Уральском радиоактивном следе // Радиация и риск. 2017. Т. 26, № 1. С. 100-114. DOI: 10.21870/0131-3878-2017-26-1-100-114.
20. Preston D.L., Sokolnikov M.E., Krestinina L.Yu., et al. Estimates of radiation effects on cancer risks in the Mayak worker, Techa River and Atomic Bomb Survivor studies // Radiation Protection Dosimetry. 2017 Apr. Vol. 173, No 1-3. P. 26-31. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncw316>.

Поступила: 25.11.2022 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

ORCID® <https://orcid.org/0000-0003-0497-5879>

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

ORCID® <https://orcid.org/0000-0002-4412-4481>

Для цитирования: Крестинина Л.Ю., Силкин С.С. Риск смерти от солидных злокачественных новообразований в Уральской когорте аварийно-облученного населения: 1950-2019 // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 1. С. 19-31. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-19-31

Solid cancer mortality risk in the Southern Urals populations exposed to radiation cohort: 1950–2019

Lyudmila Yu. Krestinina, Stanislav S. Silkin

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

The objective of the study is to obtain direct risk estimates of solid cancer mortality for members of the Southern Urals Populations Exposed to Radiation Cohort. Materials and methods: the cohort was first created in 2018 and combines all the residents of the Southern Urals exposed to radiation in the territory of the Techa River and East Urals Radioactive Trace. Combining individuals exposed in the two radiation accidents increased the number of cohort members to 62.5 thousand people, the number of solid cancer cases included in the analysis to 4,511 and the number of person-years at risk to 1.956 million with the maximum follow-up period up to 70 years. The analysis was conducted with the use of regression analysis and a simple parametric model for excess relative risk. Maximum likelihood method was used to calculate 95% confidence intervals. Stomach dose was taken as an analogue of the dose to soft tissues accumulated over the entire follow-up period, and calculated using the updated Dosimetry System-2016 in the Urals Research Center for Radiation Medicine. Results: the analysis revealed a statistically significant linear dependence of solid cancer mortality rates on the dose, which confirms and clarifies the conclusions of previous studies. Solid cancer mortality ERR was 0.078/100 mGy. The increase of the statistical power of the analysis due to the increase of the cohort size and extension of the follow-up period enabled to obtain statistically significant ERR values for certain population groups by sex, ethnicity and other parameters. It refines the previously obtained values, reduces uncertainty and allows using the data to refine the radiation safety standards for the population exposed to radiation in various situations.

Key words: Southern Urals Populations Exposed to radiation Cohort (SUPER), the Techa River, East Urals Radioactive Trace, EURT, radiogenic risk, solid cancer mortality, excess relative risk.

Authors' personal contribution

Krestinina L.Yu. – risk analysis, article design, article writing.

Silkin S.S. – preparing data for analysis, discussing the results, editing the article.

Acknowledgements

The work was carried out as part of the implementation of the Federal Target Program “Ensuring nuclear and radiation safety for 2016-2020 and for the period up to 2030”. We express our gratitude to the staff of the biophysical laboratory of the URCRM, headed by cand. tech. sciences Degteva M.O. for the provided dose estimates, and to the staff of the Department of the Database “Man”, under the leadership of Startsev N.V., for updating the data of the registers of the medical and dosimetric database of the URCRM, as well as to the staff of the epidemiological laboratory for preparing the data for analysis.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Funding sources

The work was carried out with the financial support of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, within the framework of the Federal target program “Ensuring nuclear

and radiation safety for 2016-2020 and for the period up to 2030”.

References

1. Akleyev AV, Kosenko MM, Krestinina LYu, Shalaginov SA, Degteva MO, Startsev NV. Health status of the population residing in the South Urals territories contaminated with radionuclides. Moscow: RADECON; 2001: 194. (In Russian).
2. Consequences of anthropogenic radiation exposure and rehabilitation problems of the Ural region. Ed.: S.K. Shoygu. Moscow; 2002:287. (In Russian).
3. Ecological and medical consequences of the 1957 radiation accident at Mayak PA. Eds. Akleyev AV, Kiselev MF. Moscow: Medbioekstrem; 2001. 294 p. (In Russian).
4. Krestinina LYu, Akleev AV. Long-term somatic-stochastic effects. Edited. by AV. Akleev. Consequences of radioactive contamination of the Techa River. Chelyabinsk; 2016, Chapter 9: 270-330. (In Russian).
5. Kosenko MM, Thomas TL, Akleyev AV, Krestinina LY, Startsev NV, Vyushkova OV, et al. The Techa River Cohort: study design and follow-up methods. *Radiation Research*. 2005 Nov;164(5): 591-601. DOI: 10.1667/rr3451.1.
6. Silkin SS, Krestinina LYu, Startsev NV, Akleev AV. Ural cohort of emergency-irradiated population. *Meditsina ekstremal'nykh situatsiy = Medicine of Extreme Situations*. 2019;21(3): 393-402. (In Russian).
7. Krestinina LYu, Silkin SS, Mikryukova LD, Epifanova SB, Akleyev AV. Solid cancer incidence risk in the Ural cohort of the accidentally exposed population: 1956–2017. *Radiatsionnaya*

Lyudmila Yu. Krestinina

Urals Research Center for Radiation Medicine

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

- Gygienna = *Radiation Hygiene*. 2020;13(3): 6-17. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2020-13-3-6-17>.
8. Degteva MO, Tolstykh EI, Vorobyeva MI, Shagina NB, Anspaugh LR, Napier BA, et al. Techa river dosimetric system: present and future. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Issues of radiation safety*. 2006;1: 81–95. (In Russian).
9. Tolstykh EI, Peremyslova LM, Degteva MO, Napier BA. Reconstruction of radionuclide intakes for the residents of East Urals Radioactive Trace (1957-2011). *Radiation Environmental Biophysics*. 2017 Mar;56(1): 27-45. DOI:10.1007/s00411-016-0677-y.
10. Tolstykh EI, Degteva MO, Peremyslova LM, Shagina NB, Shishkina EA, Krivoschapov VA, et al. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: Strontium-90. *Health Physics*. 2011 Jul;101(1): 28–47.
11. Tolstykh EI, Degteva MO, Peremyslova LM, Shagina NB, Vorobyeva MI, Anspaugh LR, et al. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: 137Cs. *Health Physics*. 2013;104(5): 481–498.
12. Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, Shishkina EA, Shagina NB, Volchkova AY, 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 Oct;117(4): 378-387. DOI: 10.1097/HP.0000000000001067.
13. Krestinina LYu, Kharyuzov YuE, Epifanova SB, Tolstykh EI, Deltour I, Scuz J, et al. Cancer incidence after in utero exposure to ionizing radiation in Techa River Residents. *Radiation Research*. 2017;188: 314-324. DOI: 10.1667/RR14695.1.
14. World Health Organization. Global Health Observatory. Geneva: World Health Organization; 2018: 45-48.
15. Malignant neoplasms in Russia in 2011 (morbidity and mortality) Eds. Chissov VV, Petrov GV. Moscow: FGBU «MNIIOI im. P.A. Herzena»; 2013: 46-47 (In Russian).
16. Ferlay J, Colombet M, Soerjomataram I, Mathers C, Parkin DM, Piñeros M, et al. Global and Regional Estimates of the Incidence and Mortality for 38 Cancers: GLOBOCAN 2018. Lyon: International Agency for Research on Cancer. World Health Organization; 2018: 33-39.
17. Preston DL, Lubin J, Pierce D, and McConney. *Epicure Users Guide*. Seattle, Washington: Hirosoft International Company; 1993.
18. Akaike H. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*. December 1974;19(6): 716-723. DOI: 10.1109/TAC.1974.1100705.
19. Krestinina LYu, Silkin SS, Mikryukova LD, Epifanova SB, Akleyev AV. Comparative analysis of the risk of the mortality from solid malignant tumors for the public exposed at Techa river and East-Ural radioactive trace. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2017;26(1): 100–114 (In Russian). DOI: 10.21870/0131-3878-2017-26-1-100-114.
20. Preston DL, Sokolnikov ME, Krestinina LYu, Daniel OS. Estimates of radiation effects on cancer risks in the Mayak worker, Techa River and Atomic Bomb Survivor studies. *Radiation Protection Dosimetry*. 2017 Apr;173(1-3): 26-31. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncw316>.

Received: November 25, 2022

For correspondence: Lyudmila Yu. Krestinina – candidate of medical sciences, head of the epidemiological laboratory of Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia (68A Vorovsky street, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: ludmila@urcrm.ru)

ORCID® <https://orcid.org/0000-0003-0497-5879>

Stanislav S. Silkin – junior researcher of epidemiological laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

ORCID® <https://orcid.org/0000-0002-4412-4481>

For citation: Krestinina L.Yu., Silkin S.S. Solid cancer mortality risk in the Southern Urals populations exposed to radiation cohort: 1950–2019. *Radiatsionnaya Gygienna = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 1. P. 19-31. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-19-31

Исследование радиопротекторных свойств фумаровой кислоты и фумарата 3-оксипиридина при действии ионизирующего излучения на клетки человека

П.С. Купцова ^{1,2}, Л.Н. Комарова ¹, Е.Р. Выпова ¹

¹ Обнинский институт атомной энергетики — филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Обнинск, Россия

² Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба — филиал Национального медицинского исследовательского центра радиологии Министерства здравоохранения России, Обнинск, Россия

В современном мире сложилась такая обстановка, что развитие ядерной энергетики и применение источников ионизирующих излучений в различных сферах деятельности создали потенциальную угрозу радиационной опасности для человека. В связи с этим актуальным направлением является изучение способов повышения радиорезистентности клеток и тканей человека к действию ионизирующего излучения. Кроме того, радиозащитные соединения имеют важное значение и в лучевой терапии, поскольку нормальные ткани пациентов должны быть защищены от лучевого поражения при использовании высоких доз облучения при лечении злокачественных новообразований. Однако радиопротекторы, применяемые в настоящее время, обладают некоторыми недостатками. Цель работы — исследование радиопротекторных свойств фумаровой кислоты и фумарата 3-оксипиридина при действии гамма-излучения и излучения ионов ^{12}C на опухолевые (нейробластома SK-N-BE) и нормальные (фибробласты hTERT) клетки человека. Действие излучения оценивалось по критериям выживаемости клеток в культуре, времени удвоения и клоногенной активности. Показано, что применение фумаровой кислоты и фумарата 3-оксипиридина оказывает радиозащитное действие на нормальные и опухолевые клетки при облучении их гамма-излучением в дозах 1, 4, 6 и 10 Гр. Применение фумаровой кислоты и фумарата 3-оксипиридина не оказывает радиозащитное действие на опухолевые клетки при облучении их ионами ^{12}C . Сравнительный анализ результатов действия препаратов при облучении гамма-квантами и ионами ^{12}C показал существенную зависимость проявления модифицирующих свойств от качества излучения. Исследование времени удвоения клеток показало, что присутствие в контроле препаратов не увеличивало данный показатель. Напротив, при действии гамма-излучения в дозе 10 Гр препараты снижали время удвоения фибробластов более чем в 2 раза и время удвоения клеток нейробластомы почти в 1,5 раза. Полученные данные говорят о том, что антиоксидантные свойства изученных препаратов открывают новые возможности модификации действия ионизирующего излучения при терапии онкологических заболеваний. Применение фумаровой кислоты и фумарата 3-оксипиридина позволит уменьшить лучевую нагрузку на здоровые клетки, в том числе снизить действие вторичных продуктов на здоровые клетки за ником Брэгга при действии ионно-углеродной терапии.

Ключевые слова: радиопротекторы, гамма-излучение, ионы ^{12}C , фибробласты, нейробластома, выживаемость, клоногенный анализ, время удвоения, фумаровая кислота, фумарат 3-оксипиридина.

Введение

В современном мире актуальной и нерешенной проблемой является увеличение числа онкологических заболеваний. Злокачественные новообразования являются основной причиной смерти во всем мире, на их долю приходится около 10 млн смертей в 2020 г. (каждый шестой случай смерти). Наиболее распространенными видами опухолей являются опухоли молочной железы,

легких, толстой и прямой кишки и рак предстательной железы [1]. В Российской Федерации в 2020 г. выявлено 556 036 случаев онкологических заболеваний, совокупный показатель распространенности составил 2712,9 на 100 тыс. населения [2].

Для лечения онкологических заболеваний применяются различные методы и подходы. Основными являются лучевая терапия [3], хирургический метод [4] и лекарственная

Купцова Полина Сергеевна

Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Национального медицинского исследовательского центра радиологии

Адрес для переписки: 249039, Калужская область, городской округ «Город Обнинск», город Обнинск, тер. Студгородок, д. 1; E-mail: kuptsova_apollinaria@mail.ru

терапия: химиотерапия [5], иммунотерапия [6], гормональная [7], таргетная [8] и фотодинамическая терапия [9].

Одним из основных методов лечения злокачественных новообразований является метод лучевой терапии [3].

Большой трудностью в проведении лучевой терапии является то, что между опухолью и источником излучения чаще всего находятся здоровые ткани [10]. От их объема напрямую зависит количество побочных эффектов от проведенной терапии (развитие лучевых повреждений нормальных тканей) [11].

Адронная терапия, в том числе протонами и углеродными пучками, является на сегодняшний день наиболее эффективной формой лучевой терапии неоперабельных, глубоко расположенных опухолей, в том числе радиорезистентных [12]. Существенным недостатком применения тяжелых заряженных частиц в лечении онкологических заболеваний является их деление на осколки, которые имеют большой пробег по отношению к первичным ионам [13, 14]. В связи с этим растет дозовая нагрузка на здоровые ткани. При этом с увеличением глубины растет количество осколков, достигая своего максимума вблизи пика Брэгга. Вторичными продуктами при ионно-углеродной терапии являются гамма-кванты, нейтроны, электроны, позитроны, протоны, дейтроны, тритоны, альфа-частицы, ^3He , ^6Li , ^7Li , ^9Be , ^{10}Be , ^{10}B , ^{11}B , ^{11}C , ^{13}C , ^{14}C , ^{13}N , ^{14}N , ^{15}N и ^{16}O [14].

На сегодняшний день актуальным является поиск и разработка различных химических веществ для защиты здоровых тканей от повреждающего действия лучевой терапии [15, 16]. Радиопротекторы, применяемые при терапии опухолей, обладают некоторыми недостатками. Большая часть из них характеризуются острой и хронической токсичностью, которая накапливается при многократном применении. Используемые радиопротекторы также не обеспечивают защиту организма при пролонгированном или фракционированном облучении низкой интенсивности [17]. Поэтому в настоящее время актуальным направлением является поиск новых химических соединений, способных оказывать радиозащитное действие. Широкий поиск возможных радиопротекторов проводится среди антиоксидантных соединений [18].

В работе было проведено исследование радиопротекторных свойств фумаровой кислоты и фумарата 3-оксипиридина на нормальные и опухолевые клетки человека при действии гамма-излучения и излучения ионов ^{12}C .

Фумаровая кислота – метаболитический промежуточный продукт, который образуется в растениях (например, *Fumaria officinalis*), в коже человека при действии ультрафиолетового излучения, а также при некоторых химических и физических процессах. Фумаровая кислота нашла широкое применение в современной медицине. Препараты на основе фумаровой кислоты оказывают метаболитическое действие, улучшают энергетический и пластический обмен в организме человека, а также оказывают антиоксидантное, противовоспалительное, обезболивающее, антипсориазное, иммуномодулирующее и нейрорепараторное действие. Фумаровую кислоту назначают при кардиологических, неврологических, гепатологических патологиях, а также для лечения псориаза, экземы и других кожных заболеваний. Механизм лечебного действия фумаровой кислоты обусловлен тем, что она активирует антиоксидантные сигнальные пути в организме, оказывая защитную роль

в окислительном стрессе, например, в процессе воспаления [19, 20, 21].

Фумарат 3-оксипиридина (далее фумарат 3-ОП) – химическое вещество, имеющее гидроксильную группу в пиридиновом ядре и обладающее в связи с этим антирадикальной, антиокислительной, метаболитической и кардиопротекторной активностью [22, 23]. Вещество является солью 2-метил-6-этил-3-гидроксипиридина с фумаровой кислотой, получаемое при взаимодействии 2-этил-6-метил-3-гидроксипиридина и фумаровой кислоты в среде растворителя. Вещество может быть использовано при лечении эндокринных, сердечно-сосудистых заболеваний, в неотложной терапии и реанимации [23].

Особый интерес представляет собой исследование наличия у перечисленных веществ радиопротекторных качеств, которые могут быть обусловлены наличием антиокислительных, антиоксидантных и антирадикальных свойств. Следовательно, дальнейшие работы по изучению свойств фумаровой кислоты и фумарата 3-оксипиридина являются актуальными.

Цель исследования – изучение радиопротекторных свойств фумаровой кислоты и фумарата 3-оксипиридина при действии гамма-излучения и излучения ионов ^{12}C на опухолевые и нормальные клетки человека.

Материалы и методы

Объект исследования. Клеточные линии: фибробласты hTERT – нормальные клетки соединительной ткани и нейробластома SK-N-BE – эмбриональная опухоль стволовых нервных клеток – нейробластов.

Методика. Клетки культивировали по стандартной методике [24]. Культивация происходила в пластиковых культуральных флаконах («Corning», США) в виде монослоя в полной питательной среде DMEM («ПанЭко», Россия), содержащей 10% фетальной сыворотки крупного рогатого скота («Gibco», USA), пенициллин (50000 ед/л) («ПанЭко», РФ), стрептомицин (50 мг/л) («ПанЭко», Россия) и глутамин (292 мг/л) («ПанЭко», Россия). Поддерживали жизнеспособность культур в CO_2 -инкубаторе при температуре 37°C («CB 53 Binder», Германия) и при 5% содержании CO_2 .

Перед началом облучения флаконы с монослоем трипсинизировали раствором Трипсина – Версена (1:1), готовили суспензию клеток, осуществляли подсчет клеток в камере Горяева, доводя суспензию до нужной концентрации $\sim 5 \times 10^4$ кл/мл. Далее клетки помещали для последующего облучения в пробирки типа «Эппендорф» объемом 1,5 мл. Клетки инкубировали с исследуемыми препаратами в концентрациях 0,05 мг/мл в течение 24 ч, основываясь на работе [25], а также на результатах тестов (время удвоения, МТТ-тест) на токсичность исследуемых препаратов, проведенных самостоятельно авторами статьи. Транспортировку клеток осуществляли при температуре тающего льда.

Тест: анализ клоногенной активности (выживаемость). Клетки инкубировали в течение 7–14 дней до формирования колоний, видимых невооруженным глазом (в диаметре не менее 0,75 мм). Время удвоения: облученные клетки высеивают в чашки Петри в концентрации $1 \cdot 10^4$ клеток на чашку. Клетки культивировали в течение 48 ч. Затем сливали питательную среду и промывали раствором Трипсина – Версена, добавляли 1 мл указанного раствора, а затем оставляли в термостате на 30 мин. Снятые

с поверхности клетки подсчитывали в камере Горяева. Время удвоения рассчитывали по формуле:

$$D = tp * \frac{\log 2}{\log\left(\frac{N_2}{N_1}\right)}, \quad (1)$$

где tp – время культивирования, N_1 – начальное количество клеток, N_2 – конечное количество клеток.

Исследуемые препараты: фумаровая кислота, фумарат 3-оксипиридина.

Источники ионизирующего излучения и условия облучения. На часть клеток действовало только ионизирующее излучение, часть клеток облучали с препаратом. Контролем служили интактные клетки (необлученные и не обработанные препаратами). После процедуры облучения и на протяжении доставки в лабораторию клетки выдерживали при температуре тающего льда.

Облучение ионами ^{12}C проводили на каскаде ускорителя «У-70» Института физики высоких энергий (ИФВЭ) ФГБУ ГНЦ РФ «Курчатовский институт» (г. Протвино). Облучение осуществлялось в водном фантоме со средней энергией 455,8 МэВ/нуклон. Дозы облучения: 1, 4, 6, 10 Гр.

Облучение гамма-квантами проводили на уникальной научной установке ФГБНУ ВНИИРАЭ «ГУР-120» (источник ионизирующего излучения ^{60}Co , $E_{\text{ср}} = 1,25$ МэВ). Мощность дозы составила 0,9 Гр/мин. Дозы облучения: 1, 4, 6, 10 Гр.

Каждая серия опытов повторялась 3–5 раз. Обработку полученной информации и графическое представление данных проводили с использованием пакета приложений Microsoft Office 2010. Графические изображения были созданы в программе SigmaPlot 11.0. Для оценки значимости различий средних величин выживаемости, полученных в разных сериях опытов, оценивали с применением непараметрического критерия Крамера – Уэлча, т.к. длина вариационного ряда не превышала 3 значений. Наблюдаемые различия считали статистически значимыми (достоверными) при уровне значимости $P < 0,05$.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлен результат действия ионизирующего излучения (^{60}Co) без препаратов (кривая 1, светлые круги), в присутствии фумаровой кислоты (кривая 3, темные круги) или фумарата (кривая 2, темные квадраты) на фибробласты человека. Фактор изменения дозы (ФИД), определяемый отношением изозффективных доз D_0 , составляет 1,5 для фумаровой кислоты и 1,2 для фумарата. Данные рисунка 1 свидетельствуют о значимых протекторных свойствах фумаровой кислоты и фумарата 3-оксипиридина по отношению к действию γ -излучения на нормальные клетки человека.

Далее на рисунке 2 представлены результаты исследования действия ионизирующего излучения (^{60}Co) без препаратов (кривая 1, светлые ромбы), в присутствии фумаровой кислоты (кривая 3, темные шестиугольники) или фумарата (кривая 2, темные треугольники) на клетки нейробластомы человека. Фактор изменения дозы (ФИД), определяемый отношением изозффективных доз D_0 , составляет 1,3 для фумаровой кислоты и 1,1 для фумарата. Данные рисунка 2 свидетельствуют о наличии радиопротекторных свойств фумаровой кислоты и фумарата 3-оксипиридина по отношению к действию γ -излучения и на опухолевые клетки человека, что объясняется неселективностью изучаемых препаратов к нормальным клеткам человека.

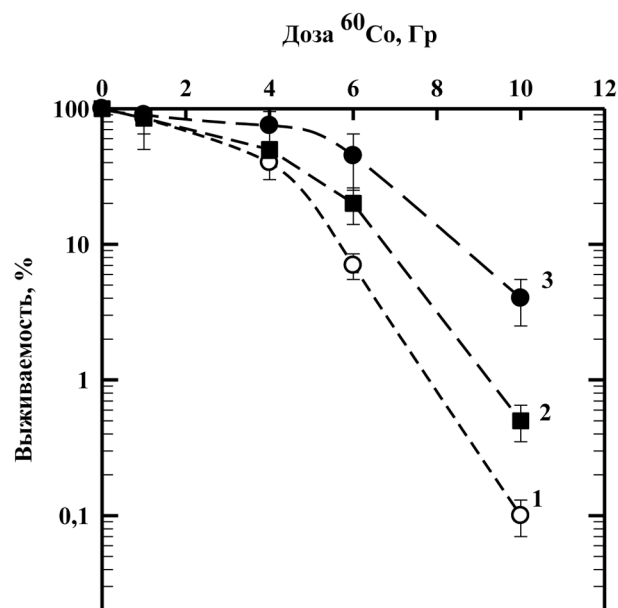


Рис. 1. Влияние фумаровой кислоты и фумарата 3-оксипиридина на выживаемость фибробластов человека, облученных γ -квантами. Светлые значки – действие излучения, темные – результат действия излучения в присутствии препаратов

[Fig. 1. Effect of fumaric acid and 3-hydroxypyridine fumarate on the survival of human fibroblasts irradiated with γ -rays. Light symbols – the effect of radiation, dark symbols – the result of the action of radiation in the presence of the drugs]

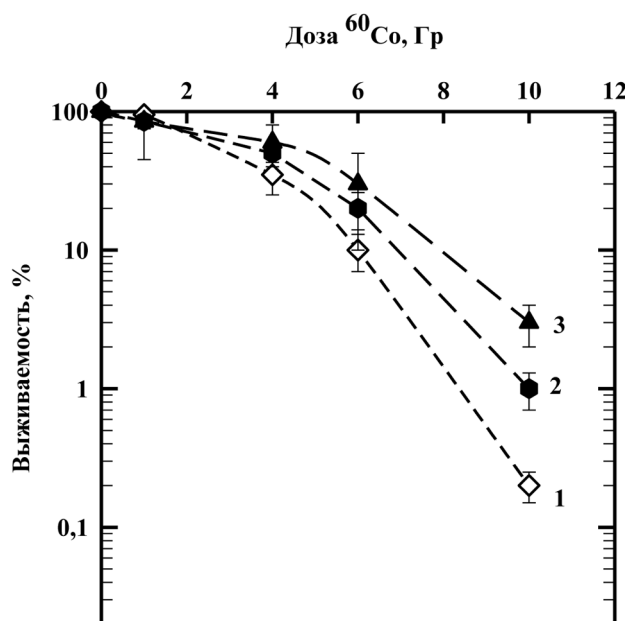


Рис. 2. Влияние фумаровой кислоты и фумарата 3-оксипиридина на выживаемость клеток нейробластомы человека, облученных γ -квантами. Светлые значки – действие излучения, темные – результат действия излучения в присутствии препаратов

[Fig. 2. Effect of fumaric acid and 3-hydroxypyridine fumarate on the survival of human neuroblastoma cells irradiated with γ -rays. Light icons – the effect of radiation, dark – the result of the action of radiation in the presence of the drugs]

Представляло интерес проверить степень проявления защитных свойств исследуемых препаратов при действии ионов ^{12}C на клетки нейробластомы человека. Ионы ^{12}C обладают большим поражающим действием на клетки, чем гамма-излучение. В то же время при нейробластоме стандартные методы лучевой терапии редко входят в схему лечения из-за высокого риска развития отдаленных осложнений у детей. Особенно важно не допустить облучения здоровых тканей позвоночника (спинной мозг), суставов, яичников. Терапия ионами углерода в большей степени, чем другие виды лучевой терапии, позволяет минимально воздействовать на окружающие здоровые ткани.

Далее на рисунке 3 представлены результаты исследования действия ионизирующего излучения (^{12}C) без препаратов (кривая 1, светлые ромбы), в присутствии фумаровой кислоты (кривая 3, темные ромбы) или фумарата (кривая 2, темные треугольники) на клетки нейробластомы человека. Из рисунка 3 видно, что при действии ионов углерода препараты не проявили защитного действия, что может быть объяснено высокой ОБЭ ионного излучения. Теоретически это представляет большой интерес, так как здоровые клетки, находящиеся за пиком Брэгга, могут быть защищены от вторичных продуктов ионно-углеродной терапии (например, гамма-квантов [14]), в то время как на опухолевые клетки радиозащитное действие препаратов распространяться не будет.

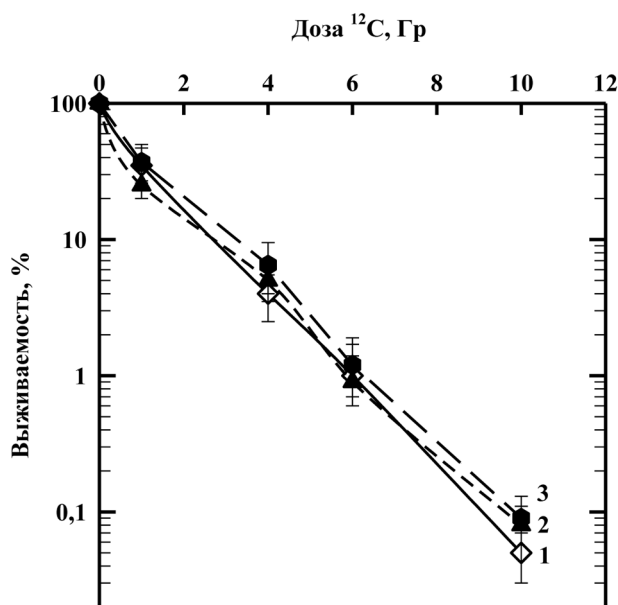


Рис. 3. Влияние фумаровой кислоты и фумарата 3-оксипиридина на выживаемость клеток нейробластомы человека, облученных ионами ^{12}C . Светлые значки – действие излучения, темные – результат действия излучения в присутствии препаратов
[Fig. 3. Effect of fumaric acid and 3-hydroxypyridine fumarate on the survival of human neuroblastoma cells irradiated with ^{12}C ions. Light icons – the effect of radiation, dark – the result of the action of radiation in the presence of drugs]

На следующем этапе работы оценивалось влияние облучения, препаратов и их комбинированного действия на исследуемые клеточные линии по показателю – время удвоения. В суспензию клеток вносили препарат, который

до облучения действовал на клетки в течение 24 ч, затем клетки облучали.

Данные по изменению времени удвоения нормальных клеток человека (фибробластов) представлены на рисунке 4. Точки 1, 2 и 3 отображают время удвоения intactных клеток, клеток, инкубированных 24 ч с фумаровой кислотой и клеток, инкубированных 24 ч с фумаратом, соответственно. Кривая 4 – действие гамма-излучения без препаратов, кривая 5 – действие гамма-излучения на клетки, инкубированные в присутствии фумаровой кислоты, кривая 6 – действие гамма-излучения на клетки, инкубированные в присутствии фумарата. Из рисунка 4 видно, что присутствие в контроле препаратов не увеличивало время удвоения клеток. Напротив, при действии гамма-излучения препараты существенно снижали время удвоения клеток – более чем в 2 раза при дозе излучения 10 Гр.

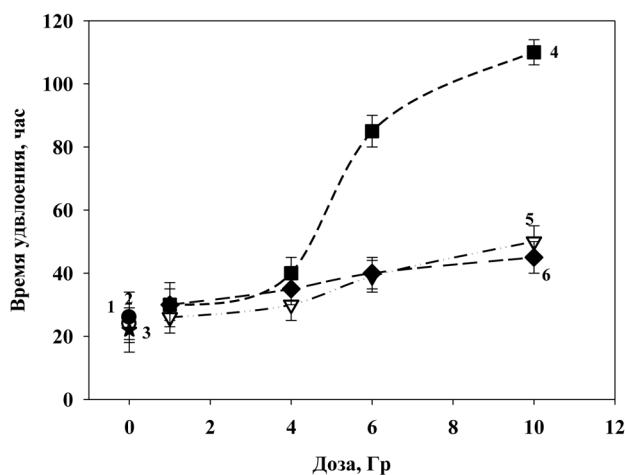


Рис. 4. Влияние фумаровой кислоты и фумарата 3-оксипиридина на время удвоения фибробластов человека, облученных γ -квантами
[Fig. 4. Effect of fumaric acid and 3-hydroxypyridine fumarate on the doubling time of human fibroblasts irradiated with γ -rays]

Данные по изменению времени удвоения опухолевых клеток человека (нейробластома) представлены на рисунке 5. Точки 1, 2 и 3 отображают время удвоения intactных клеток, клеток, инкубированных 24 ч с фумаровой кислотой, и клеток, инкубированных 24 ч с фумаратом, соответственно. Кривая 4 – действие гамма-излучения без препаратов, кривая 5 – действие ионов ^{12}C без препаратов, кривая 6 – действие гамма-излучения на клетки, инкубированные в присутствии фумаровой кислоты, кривая 7 – действие гамма-излучения на клетки, инкубированные в присутствии фумарата, кривая 8 – действие ионов ^{12}C на клетки, инкубированные в присутствии фумаровой кислоты, кривая 9 – действие ^{12}C на клетки, инкубированные в присутствии фумарата. Из рисунка 5 видно, что присутствие в контроле препаратов также не увеличивало время удвоения клеток. Напротив, при действии двух видов ионизирующего излучения препараты снижали время удвоения клеток: почти в 1,5 раза при действии гамма-излучения в дозе 10 Гр и в 1,3 раза при действии ионов ^{12}C в дозе 10 Гр.

Продemonстрированные результаты говорят о том, что антиоксидантные свойства изученных препаратов

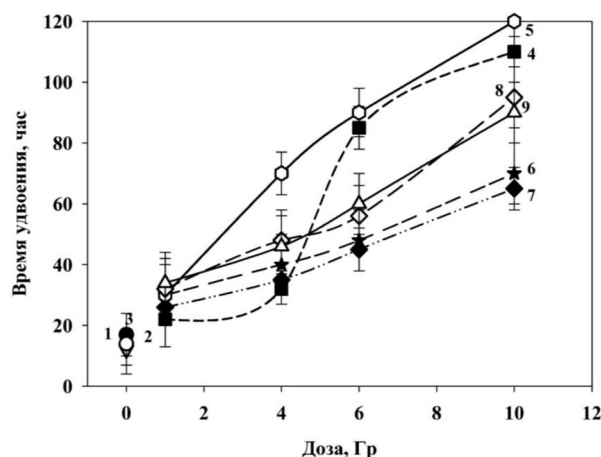


Рис. 5. Влияние фумаровой кислоты и фумарата 3-оксипиридина на время удвоения клеток нейробластомы человека, облученных γ -квантами и ионами ^{12}C
[Fig. 5. Effect of fumaric acid and 3-hydroxypyridine fumarate on the doubling time of human neuroblastoma cells irradiated with γ -rays and ^{12}C ions]

открывают новые возможности модификации действия ионизирующего излучения при терапии онкологических заболеваний. Применение фумаровой кислоты и фумарата 3-оксипиридина позволит уменьшить лучевую нагрузку на здоровые клетки, в том числе снизить действие вторичных продуктов на здоровые клетки за пиком Брэгга при действии ионно-углеродной терапии.

Заключение

В ходе данной работы было проведено исследование радиозащитных свойств фумаровой кислоты и фумарата 3-оксипиридина на здоровых и опухолевых клетках человека при действии гамма-излучения и ионов ^{12}C .

Показано, что применение фумаровой кислоты и фумарата 3-оксипиридина оказывает радиозащитное действие на нормальные и опухолевые клетки при облучении их гамма-излучением в дозах 1, 4, 6 и 10 Гр. Проявление радиопротекторных свойств у фумаровой кислоты и фумарата 3-оксипиридина по отношению к действию γ -излучения на опухолевые клетки человека объясняется тем, что исследуемые препараты не обладают селективностью по отношению к нормальным клеткам человека.

Показано, что применение фумаровой кислоты и фумарата 3-оксипиридина не оказывает радиозащитное действие на опухолевые клетки при облучении их ионами ^{12}C . При действии ионов углерода препараты не наблюдались радиозащитный эффект. Это объясняется высокой ОБЭ ионного излучения. Полученные данные представляют большой интерес, так как нормальные ткани, находящиеся за пиком Брэгга, могут быть защищены от вторичных продуктов ионно-углеродной терапии (например, гамма-квантов), в то время как опухолевые клетки не будут подвергаться радиозащитному действию препаратов.

В статье сравнивается модифицирующее действие изучаемых препаратов при комбинированном применении их либо с гамма-квантами (см. рис. 1 и 2), либо с ионами углерода (см. рис. 3). Из полученных данных видно, что применение фумаровой кислоты и фумара-

та 3-оксипиридина оказывает радиозащитное действие на нормальные и опухолевые клетки при облучении их гамма-излучением в дозах 1, 4, 6 и 10 Гр (см. рис. 1 и 2). Применение фумаровой кислоты и фумарата 3-оксипиридина не оказывает радиозащитное действие на опухолевые клетки при облучении их ионами ^{12}C в дозах 1, 4, 6 и 10 Гр (см. рис. 3).

В нашей работе применяются два принципиально разных по качеству излучения: гамма-кванты – это фотонное излучение, характеризующееся в основном косвенным действием на живые объекты, связанным с развитием перекисного окисления липидов и окислительным стрессом. Двойные разрывы ДНК, которые сложно репарируются, при таком облучении наблюдаются лишь при высоких дозах.

Облучение высокоэнергетическими ионами углерода – второй тип излучения, который используется в данной работе. Данный вид излучения является плотной ионизирующим и характеризуется прямым действием, которое вызывает появление большого числа двухнитевых разрывов ДНК.

Также в работе было оценено влияние облучения, препаратов и их комбинированного действия на время удвоения клеток. Присутствие в контроле препаратов не увеличивало время удвоения клеток, что подтверждает проведенные ранее исследования об отсутствии токсичности препаратов в исследуемой концентрации. Напротив, при действии гамма-излучения препараты существенно снижали время удвоения фибробластов более чем в 2 раза при дозе 10 Гр и время удвоения клеток нейробластомы почти в 1,5 раза. Также время удвоения клеток нейробластомы снижалось в 1,3 раза при действии ионов ^{12}C в дозе 10 Гр.

Полученные данные позволяют говорить о том, что исследованные препараты, помимо всего прочего, проявляют радиозащитные свойства и могут быть исследованы далее в качестве радиопротекторов на других видах ионизирующего излучения, а также на более широком спектре культур клеток человека. Все это в конечном счете открывает новые возможности уменьшения лучевой нагрузки на здоровые ткани человека, в том числе снижения поражающего действия вторичных продуктов на здоровые клетки за пиком Брэгга при действии ионно-углеродной терапии.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Купцова П.С. – разработка дизайна исследования, сбор и анализ данных, обработка полученных результатов, формулировка научных гипотез, написание текста.

Комарова Л.Н. – научное руководство исследованием, разработка дизайна исследования, формулировка научных гипотез, финальное редактирование статьи.

Выпова Е.Р. – сбор и анализ данных, обработка полученных результатов.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Публикация не имела финансовой поддержки.

Литература

1. Ferlay J., Colombet M., Soerjomataram I., et al. Cancer statistics for the year 2020: An overview // International

- Journal of Cancer. 2021. Vol. 149, No. 4. P. 778–789. DOI:10.1002/jjc.33588.
2. Каприн А.Д., Старинский В.В., Шахзадова А.О. Злокачественные новообразования в России в 2020 году (заболеваемость и смертность). М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2021. 252 с.
3. Abshire D., Lang, M.K. The Evolution of Radiation Therapy in Treating Cancer // *Seminars in oncology nursing*. 2018. Vol. 34, No. 2. P. 151–157. DOI:10.1016/j.soncn.2018.03.006.
4. Ben Barak A., Golan H., Waldman D., Arkovitz M.S. Surgical Treatment of Neuroblastoma // *The Israel Medical Association journal: IMAJ*. 2017. Vol. 19, No. 11, P. 691–695.
5. Wang H., Mao X. Evaluation of the Efficacy of Neoadjuvant Chemotherapy for Breast Cancer // *Drug design, development and therapy*. 2020. Vol. 14. P. 2423–2433. DOI: 10.2147/DDDT.S253961.
6. Thomas R., Al-Khadairi G., Roelands J., et al. NY-ESO-1 Based Immunotherapy of Cancer: Current Perspectives // *Frontiers in immunology*. 2018. Vol. 9. DOI:10.3389/fimmu.2018.00947.
7. Li H., Liu Y., Wang Y., et al. Hormone therapy for ovarian cancer: Emphasis on mechanisms and applications (Review) // *Oncology reports*. 2021. Vol. 46, No. 4. DOI:10.3892/or.2021.8174.
8. Lee Y.T., Tan Y.J., Oon C.E. Molecular targeted therapy: Treating cancer with specificity // *European journal of pharmacology*. 2018. Vol. 834. P. 188–196. DOI:10.1016/j.ejphar.2018.07.034.
9. Lange C., Bednarski P.J. Photosensitizers for Photodynamic Therapy: Photochemistry in the Service of Oncology // *Current pharmaceutical design*. 2016. Vol. 22, No. 46. P. 6956–6974. DOI:10.2174/1381612822666161124155344.
10. Wang K., Tepper J.E. Radiation therapy-associated toxicity: Etiology, management, and prevention // *CA: a cancer journal for clinicians*. 2021. Vol. 71, No. 5. P. 437–454. DOI: 10.3322/caac.21689.
11. Gardner S.J., Kim J., Chetty I.J. Modern Radiation Therapy Planning and Delivery // *Hematology/Oncology Clinics of North America*. 2019. Vol. 33, No. 6. P. 947–962. DOI:10.1016/j.hoc.2019.08.005.
12. Hwang E.J., Gorayski P., Le H., et al. Particle therapy tumour outcomes: An updated systematic review // *Journal of medical imaging and radiation oncology*. 2020. Vol. 64, No. 5. P. 711–724. DOI:10.1111/1754-9485.13021.
13. Aricò G., Gehrke T., Gallas R., et al. Investigation of single carbon ion fragmentation in water and PMMA for hadron therapy // *Physics in medicine and biology*. 2019. Vol. 64, No. 5. DOI:10.1088/1361-6560/aafa46.
14. Johnson D., Chen Y., Ahmad S. Dose and linear energy transfer distributions of primary and secondary particles in carbon ion radiation therapy: A Monte Carlo simulation study in water // *Journal of medical physics*. 2015. Vol. 40, No. 4. P. 214–219. DOI:10.4103/0971-6203.170785.
15. Aliper A.M., Bozdoganyan M.E., Sarkisova V.A., et al. Radioprotectors.org: an open database of known and predicted radioprotectors // *Aging*. 2020. Vol. 12, No. 15. P. 15741–15755. DOI:10.18632/aging.103815.
16. Mun G.I., Kim S., Choi E., et al. Pharmacology of natural radioprotectors // *Archives of Pharmacological Research*. 2018. Vol. 41, No. 11. P. 1033–1050. DOI:10.1007/s12272-018-1083-6.
17. Mishra K., Alsbeih G. Appraisal of biochemical classes of radioprotectors: evidence, current status and guidelines for future development // *3 Biotech*. 2017. Vol. 7, No. 5. DOI: 10.1007/s13205-017-0925-0.
18. Бутомо Н.В., Гребенюк А.Н., Легеза В.И., и др. Основы медицинской радиобиологии. Под общ. Ред. Ушакова И.Б. СПб., изд. «Фолиант», 2004. 380 с.
19. Ilica R.A., Kloetzer L., Galaction A.I., Cașcaval D. Fumaric acid: production and separation // *Biotechnology letters*. 2019. Vol. 41, No. 1. P. 47–57. DOI:10.1007/s10529-018-2628-y.
20. Wipke B.T., Hoepner R., Strassburger-Krogias K., et al. Different Fumaric Acid Esters Elicit Distinct Pharmacologic Responses // *Neurology(R) neuroimmunology & neuroinflammation*. 2021. Vol. 8, No. 2. DOI:10.1212/NXI.0000000000000950.
21. Volc-Platzer B. Fumaric acid esters for paediatric psoriasis // *The British journal of dermatology*. 2021. Vol. 185, No. 1. P. 5–6. DOI: 10.1111/bjd.20057.
22. Коршунова А.Б., Костычев Н.А., Инчина В.И., Чаиркин И.Н. Перспективы фармакологической коррекции острой ишемии головного мозга // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2009. Т. 11, № 1. С. 1287–1290.
23. Сайт «Соль 2-этил-6-метил-3-гидроксипиридина с фумаровой кислотой, обладающая метаболической и кардиопротекторной активностью, и способ ее получения». URL: <https://patents.google.com/patent/RU2365582C1/ru> (Дата обращения: 11.11.2022).
24. Прилепский А.Ю., Дроздов А.С., Богатырев В.А., Староверов С.А. Методы работы с клеточными культурами и определение токсичности наноматериалов. СПб: Университет ИТМО, 2019. 43 с.
25. Уланова Т.В., Инчина В.И., Русейкин Н.С. и др. Исследование влияния новых производных 3-гидроксипиридина и препаратов сравнения на выживаемость и некоторые биохимические показатели крови белых крыс при экспериментальном диабете // *Вестник Мордовского университета*. 2016. Т. 26, № 2. С. 180–191.

Поступила: 14.12.2022 г.

Купцова Полина Сергеевна – преподаватель отделения биотехнологий, Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Обнинск, Россия; младший научный сотрудник, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Национального медицинского исследовательского центра радиологии Минздрава России. **Адрес для переписки:** 249039, Калужская область, городской округ «Город Обнинск», город Обнинск, тер. Студгородок, д. 1. E-mail: kuptsova_apollinaria@mail.ru

Комарова Людмила Николаевна – доктор биологических наук, профессор, заведующая кафедрой биологии, Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Обнинск, Россия

Выпова Елена Романовна – заведующая учебно-научной лабораторией биологии, Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Обнинск, Россия

Для цитирования: Купцова П.С., Комарова Л.Н., Выпова Е.Р. Исследование радиопротекторных свойств фумаровой кислоты и фумарата 3-оксипиридина при действии ионизирующего излучения на клетки человека // *Радиационная гигиена*. 2023. Т. 16, № 1. С. 32–39. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-32-39

Study of the radioprotective properties of fumaric acid and 3-hydroxypyridine fumarate under the action of ionizing radiation on human cells

Polina S. Kuptsova ^{1,2}, Lyudmila N. Komarova ¹, Elena R. Vypova ¹

¹Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Obninsk, Russia

²A. Tsyb National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia

In the modern world, such a situation has developed that the development of nuclear energy and the use of sources of ionizing radiation in various fields of activity have created a potential threat of radiation hazard to humans. In this connection, the actual direction is the study of ways to increase the radioresistance of human cells and tissues to the action of ionizing radiation. In addition, radioprotective compounds are also important in radiotherapy, since normal tissues of patients must be protected from radiation damage when using high doses of radiation in the treatment of malignant neoplasms. However, the radioprotectors currently used have some disadvantages. The aim of this work is to study the radioprotective properties of fumaric acid and 3-hydroxypyridine fumarate under the action of gamma radiation and radiation of ¹²C ions on tumor (SK-N-BE neuroblastoma) and normal (hTERT fibroblasts) human cells. The effect of radiation was evaluated according to the criteria of cell survival in culture, doubling time and clonogenic activity. It has been shown that the use of fumaric acid and 3-hydroxypyridine fumarate has a radioprotective effect on normal and tumor cells when they are irradiated with gamma radiation at doses of 1, 4, 6 and 10 Gy. The use of fumaric acid and 3-hydroxypyridine fumarate does not have a radioprotective effect on tumor cells when they are irradiated with ¹²C ions. A comparative analysis of the results of the action of the preparations with gamma rays and ¹²C ions showed a significant dependence of the manifestation of modifying properties on the quality of radiation. The study of cell doubling time showed that the presence of drugs in the control did not increase this indicator. On the contrary, under the action of gamma radiation at a dose of 10 Gy, the preparations reduced the doubling time of fibroblasts by more than two times and the doubling time of neuroblastoma cells by almost 1.5 times. The data obtained indicate that the antioxidant properties of the studied preparations open up new possibilities for modifying the action of ionizing radiation in the treatment of oncological diseases. The use of fumaric acid and 3-hydroxypyridine fumarate will reduce the radiation load on healthy cells, including reducing the effect of secondary products on healthy cells beyond the Bragg peak under the action of carbon ion therapy.

Key words: radioprotectors, gamma radiation, ¹²C ions, fibroblasts, neuroblastoma, survival, clonogenic analysis, doubling time, fumaric acid, 3-oxypridine fumarate.

Authors' personal contribution

Polina S. Kuptsova – development of the study design, data collection and analysis, processing of results, determination of the aim of the study, writing the text of the article.

Lyudmila N. Komarova – scientific management of the study, development of the study design, determination of the aim of the study, final editing of the article.

Elena R. Vypova – data collection and analysis, processing of results.

Conflict of interest

The authors have no conflicts of interest to disclose.

Information about the source of funding

The study was not financially supported.

References

1. Ferlay J, Colombet M, Soerjomataram I, Parkin DM, Piñeros M, Znaor A, et al. Cancer statistics for the year 2020: An overview. *International Journal of Cancer*. 2021;149(4):778–789. – Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ijc.33588>. DOI:10.1002/ijc.33588. [Accessed 5 Jul 2022].
2. Kaprin AD, Starinsky VV, Shahzadova AO Malignant neoplasms in Russia in 2020 (morbidity and mortality). Moscow: National Medical Research Radiological Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation; 2021. 252 p. (In Russian).
3. Abshire D, Lang MK. The Evolution of Radiation Therapy in Treating Cancer. *Seminars in Oncology Nursing*. 2018;34(2):151–157. – Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0749208118300196?via%3Dihub>. DOI:10.1016/j.soncn.2018.03.006. [Accessed 13 Mar 2022].
4. Ben Barak A, Golan H, Waldman D, Arkovitz MS. Surgical Treatment of Neuroblastoma. *Israel Medical Association Journal*. 2017 v;19(11):691–695. – Available from: <https://www.ima.org.il/MedicinellMAJ/viewarticle.aspx?year=2017&month=11&page=691>.
5. Wang H, Mao X. Evaluation of the Efficacy of Neoadjuvant Chemotherapy for Breast Cancer. *Drug Design, Development and Therapy*. 2020;14:2423–2433. – Available from: <https://www.dovepress.com/evaluation-of-the-efficacy-of-neoadjuvant-chemotherapy-for-breast-canc-peer-reviewed-fulltext-article-DDDT>. DOI: 10.2147/DDDT.S253961. [Accessed 18 Jun 2022].
6. Thomas R, Al-Khadairi G, Roelands J, Hendrickx W, Dermime S, Bedognetti D, et al. NY-ESO-1 Based Immunotherapy of Cancer: Current Perspectives. *Frontiers in Immunology*

Polina S. Kuptsova

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering

For correspondence: Studgorodok, 1, Obninsk, Kaluga region, 249040, Russia; Email: kuptsova_apollinaria@mail.ru

- 2018 1;9:947. 2433 – Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5941317/>. DOI:10.3389/fimmu.2018.00947. [Accessed 1 May 2022].
7. Li H, Liu Y, Wang Y, Zhao X, Qi X. Hormone therapy for ovarian cancer: Emphasis on mechanisms and applications (Review). *Oncology Reports*. 2021;46(4):223. 2433 – Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8424487/>. DOI:10.3892/or.2021.8174. [Accessed 26 Aug 2022].
 8. Lee YT, Tan YJ, Oon CE. Molecular targeted therapy: Treating cancer with specificity. *European Journal of Pharmacology*. 2018 5;834:188-196. – Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0014299918304011?via%3Dihub>. DOI:10.1016/j.ejphar.2018.07.034. [Accessed 20 Jul 2022].
 9. Lange C, Bednarski PJ. Photosensitizers for Photodynamic Therapy: Photochemistry in the Service of Oncology. *Current Pharmaceutical Design*. 2016;22(46):6956-6974. DOI:10.2174/1381612822666161124155344.
 10. Wang K, Tepper JE. Radiation therapy-associated toxicity: Etiology, management, and prevention. *A Cancer Journal for Clinicians*. 2021;71(5):437-454. – Available from: <https://acsjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.3322/caac.10.3322/caac.21689>. [Accessed 3 Oct 2022].
 11. Gardner SJ, Kim J, Chetty IJ. Modern Radiation Therapy Planning and Delivery. *Hematology/oncology clinics of North America*. 2019;33(6):947-962. – Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S088985881930098X?via%3Dihub>. DOI:10.1016/j.hoc.2019.08.005. [Accessed 10 Sep 2021].
 12. Hwang EJ, Gorayski P, Le H, Hanna GG, Kenny L, Penniment M, et al. Particle therapy tumour outcomes: An updated systematic review. *Journal of Medical Imaging and Radiation Oncology* 2020;64(5):711-724. DOI:10.1111/1754-9485.13021.
 13. Aricò G, Gehrke T, Gallas R, Mairani A, Jäkel O, Martišková M. Investigation of single carbon ion fragmentation in water and PMMA for hadron therapy. *Physics in Medicine and Biology*. 2019 7;64(5):055018. – Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6560/aafa46>. DOI:10.1088/1361-6560/aafa46. [Accessed 1 Oct 2021].
 14. Johnson D, Chen Y, Ahmad S. Dose and linear energy transfer distributions of primary and secondary particles in carbon ion radiation therapy: A Monte Carlo simulation study in water. *Journal of Medical Physics*. 2015;40(4):214-9. – Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4728892/>. DOI:10.4103/0971-6203.170785. [Accessed 11 Oct 2022].
 15. Aliper AM, Bozdoganyan ME, Sarkisova VA, Veviorsky AP, Ozerov IV, Orekhov PS, et al. Radioprotectors.org: an open database of known and predicted radioprotectors. *Aging (Albany NY)*. 2020 15;12(15):15741-15755. – Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7467366/>. DOI:10.18632/aging.103815. [Accessed 11 Oct 2022].
 16. Mun GI, Kim S, Choi E, Kim CS, Lee YS. Pharmacology of natural radioprotectors. *Archives of Pharmacological Research*. 2018;41(11):1033-1050. – Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6224001/>. DOI:10.1007/s12272-018-1083-6
 17. Mishra K, Alsbeih G. Appraisal of biochemical classes of radioprotectors: evidence, current status and guidelines for future development. *Biotech*. 2017;7(5):292. – Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5574734/>. DOI: 10.1007/s13205-017-0925-0. [Accessed 12 Oct 2022].
 18. Butomo NV, Grebenjuk AN, Legeza VI, et al. Fundamentals of medical radiobiology. Saint Petersburg, «Foliant»; 2004. 380 p. (In Russian).
 19. Ilica RA, Kloetzer L, Galaction AI, Cașcaval D. Fumaric acid: production and separation. *Biotechnology Letters*. 2019;41(1):47-57. DOI:10.1007/s10529-018-2628-y.
 20. Wipke BT, Hoepner R, Strassburger-Krogias K, Thomas AM, Gianni D, Szak S, et al. Different fumaric acid esters elicit distinct pharmacologic responses. *Neurology Neuroimmunology & Neuroinflammation*. 2021;19;8(2):e950. – Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7862084/>. DOI:10.1212/NXI.0000000000000950. [Accessed 21 May 2022].
 21. Volc-Platzer B. Fumaric acid esters for paediatric psoriasis. *British Journal of Dermatology*. 2021;185(1):5-6. DOI: 10.1111/bjd.20057.
 22. Korshunova AB, Kostychev NA, Inchina VI, Chairkin IN. Prospects for pharmacological correction of acute cerebral ischemia. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2009;11(1):1287-1290. (In Russian).
 23. Site Salt of 2-ethyl-6-methyl-3-hydroxypyridine with fumaric acid with metabolic and cardioprotective activity, and method for its production: Available from: <https://patents.google.com/patent/RU2365582C1/ru>. [Accessed Nov 11 2022]. (In Russian).
 24. Prilepsky AY., Drozdov AS, Bogatyrev VA, Staroverov SA. Methods of working with cell cultures and determination of toxicity of nanomaterials. Saint Petersburg: ITMO University, 2019. 43 p. (In Russian).
 25. Ulanova TV, Inchina VI, Rusejkin NS, Hudojkina SV, Romanova JeV. Investigation of the effect of new 3-hydroxypyridine derivatives and comparators on survival and some biochemical blood parameters of white rats in experimental diabetes. *Mordovia University Bulletin*. 2016;26(2):180-191. – Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-novyh-proizvodnyh-3-gidroksipiridina-i-preparatov-sravneniya-na-vyzhivaemost-i-nekotorye-biohimicheskie>. [Accessed 14 Oct 2022]. (In Russian).

Received: December 14, 2022

For correspondence: Polina S. Kuptsova – Lecturer in the Department of Biotechnology, Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Obninsk, Russia; Junior Researcher, A. Tsyb Medical Radiological Research Center – branch of the National Medical Research Radiological Center, the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia. (Studgorodok, 1, Obninsk, Kaluga region, 249040, Russia; Email: kuptsova_apollinaria@mail.ru)

Luidmila N. Komarova – Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Biology, Obninsk Institute of Nuclear Power Engineering, Obninsk, Russia

Elena R. Vypova – Head of Educational and Scientific Laboratory of Biology, Obninsk Institute of Nuclear Power Engineering, Obninsk, Russia

For citation: Kuptsova P.S., Komarova L.N., Vypova E.R. Study of the radioprotective properties of fumaric acid and 3-hydroxypyridine fumarate under the action of ionizing radiation on human cells. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 1. P. 32-39. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-32-39

Радиационная обстановка в молодом сосновом лесу, выросшем после Чернобыльской аварии

В.П. Рамзаев, А.Н. Барковский, К.В. Варфоломеева, В.А. Некрасов

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

После Чернобыльской аварии в связи с существенным радиоактивным загрязнением сельскохозяйственных угодий определенную долю таких земель пришлось вывести из сферы обычного использования. В настоящее время одной из рассматриваемых опций возвращения заброшенных сельскохозяйственных земель в хозяйственный оборот в России является лесоводство. При использовании бывших земель сельскохозяйственного назначения для лесоводства на радиоактивно загрязненных территориях важно иметь представление о потенциальных дозах облучения, которые формируются в этом случае у работников лесного хозяйства и населения. Целью настоящего исследования являлась оценка радиационной обстановки в молодом сосновом лесу, посаженном и выросшем после Чернобыльской аварии в зоне отселения на бывшем пахотном поле. Для сравнения был взят рядом расположенный старый сосновый лес, выросший до Чернобыльской аварии. Изучение радиационной обстановки проводили в период 1998–2022 гг. В молодом лесу ^{137}Cs в верхнем 20-сантиметровом слое почвы был распределен довольно равномерно; далее с глубиной удельная активность ^{137}Cs резко снижалась. В старом лесу максимум удельной активности ^{137}Cs в почве во все годы был зарегистрирован в самом верхнем слое 0–2 см. С глубиной удельная активность ^{137}Cs уменьшалась. В 1998 г. в молодом лесу, по сравнению со старым лесом, среднее значение мощности поглощенной дозы в воздухе от ^{137}Cs было в 3 раза меньше, что связано с различиями в вертикальном распределении ^{137}Cs в почве. Со временем мощность поглощенной дозы в воздухе от ^{137}Cs на обоих участках снижалась с одинаковым эффективным периодом полууменьшения, равным 21,7 года. Удельная активность ^{137}Cs в биоте (сосна, съедобные грибы) в молодом лесу, по сравнению со старым лесом, была в 4–30 раз меньше. Компонент эффективной дозы внешнего облучения взрослого человека от источника ^{137}Cs в молодом лесу был в 3 раза меньше, чем таковой в старом лесу. Оцененный компонент эффективной дозы внутреннего облучения от ^{137}Cs при потреблении съедобных грибов из молодого леса по сравнению со старым был в 10 раз меньше. В целом, выполненное исследование показывает, что использование заброшенных радиоактивно-загрязненных пахотных земель для лесоводства может оказаться весьма целесообразным и оправданным с радиологической точки зрения.

Ключевые слова: Чернобыльская авария, заброшенные земли сельскохозяйственного назначения, лесоводство, почва, сосна, грибы, эффективная доза, ^{137}Cs .

Введение

Чернобыльская авария (1986 г.) привела к существенному радиоактивному загрязнению части территорий 3 республик бывшего Советского Союза – БССР, РСФСР и УССР [1]. При этом уровни загрязнения территории сельскохозяйственных угодий цезием-137 (^{137}Cs) оказались столь велики, что определенную долю таких земель пришлось вывести из сферы обычного землепользования [1–3]. Нарушение нормальной хозяйственной деятельности человека (вплоть до полного запрета в случае зоны отчуждения) на радиоактивно загрязненных территориях со временем привело к зарастанию деревьями и кустарниками пахотных земель, а также сенокосных и пастбищных лугов [3–5].

В настоящее время в России, в первую очередь за счет нарастания общего экономического потенциала страны и деловой активности, появились объективные условия для возвращения заброшенных сельхозземель в хозяйственный оборот. Одной из рассматриваемых опций такого возвращения (наряду с возрождением традиционных форм сельскохозяйственного земледелия) является перевод части земель сельскохозяйственного назначения в земли лесного фонда и использование их для лесоводства [3].

При использовании бывших сельхозземель для лесоводства на радиоактивно загрязненных территориях важно иметь представление о потенциальных дозах облучения, которые формируются в этом случае у работников лесного хозяйства и населения. В первом приближении

Рамзаев Валерий Павлович

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

ожидаемые пути формирования дозы облучения человека при выращивании и использовании новых лесов (далее – молодых лесов) вполне могут соответствовать таковым при использовании лесов, выросших до радиационной аварии (далее – старых лесов). Традиционно выделяют 2 пути облучения: от внешнего источника излучения, распределенного в лесной экосистеме или в жилище человека (деревянные конструкции), и от внутреннего источника излучения в организме человека за счет радионуклидов, поступивших с пищей и ингаляционно [6, 7]. При этом в отдаленном периоде после аварии доза внешнего облучения в основном формируется во время пребывания человека в радиоактивно загрязненном лесу, а доза внутреннего облучения – за счет употребления даров леса (грибов, ягод) и дичи в пищу.

Хотя сами пути облучения и источники облучения человека при использовании молодых лесов и старых лесов ожидаемо могут совпадать, численные значения доз облучения человека для этих 2 типов лесов при одних и тех же уровнях загрязнения территории радионуклидами могут различаться.

Цель исследования – сравнительная оценка радиационной обстановки в молодом и старом лесах, расположенных в зоне отселения после Чернобыльской аварии.

Задачи исследования

1. Определить плотность загрязнения и вертикальное распределение ^{137}Cs в почве.
2. Измерить мощность поглощенной дозы в воздухе от ^{137}Cs .
3. Измерить содержание ^{137}Cs в древесных растениях и съедобных грибах.
4. Дать оценку компонента эффективной дозы внешнего облучения человека от источника гамма-излучения в лесу и компонента эффективной дозы внутреннего облучения от потребления грибов.

Материалы и методы

Исследования проводили в весенне-осенний период в 1998–2022 гг. Лесные массивы, использованные для мониторинговых наблюдений и измерений, находятся на расстоянии около 1 км к югу от населенного пункта (НП) Муравинка в Злынковском районе Брянской области России. Сразу после аварии (1986 г.) официально установленная [8] плотность загрязнения почвы в этом НП, отнесенном к зоне отселения, составляла 1133 кБк/м². Лесные массивы разделены грунтовой дорогой, соединяющей Муравинку и автомобильную трассу Брянск – Гомель (рис. 1; рис. 2, нижняя панель). В обоих лесах сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*, L.) является доминирующим видом деревьев. На рисунке 2 можно наблюдать эволюцию лесов со временем. Со слов местных жителей, территория под молодым сосновым лесом в течение несколько лет после Чернобыльской аварии использовалась как пахотное поле, а посадка саженцев сосны была проведена ближе к середине 1990-х гг. Старый лес на противоположной стороне грунтовой дороги был представлен взрослыми деревьями (рис. 2, верхняя и средняя панели справа), подлесок был умеренно выражен; местами встречались скопления подроста сосны. К 2020 г. на краю старого леса, обращенному к грунтовой дороге, сформировалась

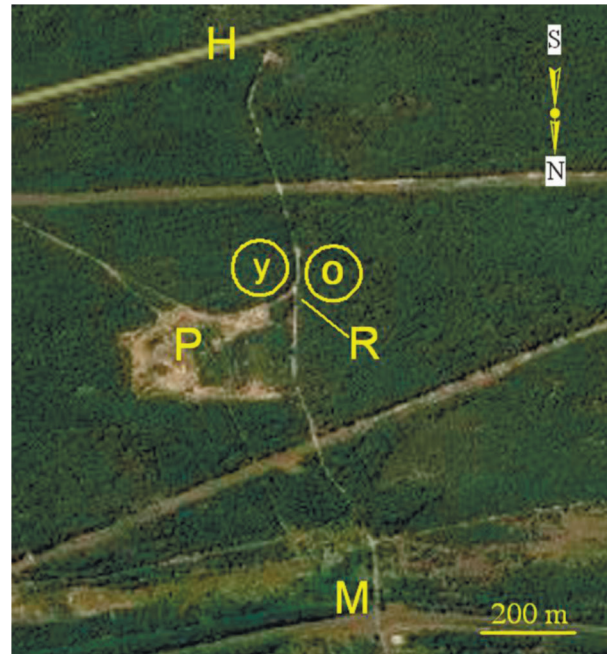


Рис. 1. Расположение обследованных площадок в молодом лесу (y) и старом лесу (o). Буквами М и Н обозначены НП Муравинка и шоссе Брянск – Гомель соответственно. Буквой Р обозначен бывший песчаный карьер. Буква R и линия указывают на место нахождения оператора на грунтовой дороге, которая соединяет Муравинку и шоссе, в момент съемки фотографии в 2022 г., размещенной на рисунке 2 (нижняя панель). Для построения рисунка использовано изображение с сайта с открытым доступом (<https://earthdata.nasa.gov/firms>) [Fig. 1. Location of surveyed sites in young forest (y) and old forest (o). The letters M and H designate the Muravinka settlement and the Bryansk–Gomel highway, respectively. The letter P denotes a former sand pit. The letter R and the line indicate the location of the operator on the dirt road that connects Muravinka and the highway at the time of taking the photo 2022 in Figure 2 (bottom panel). To construct the figure, an image from the site (<https://earthdata.nasa.gov/firms>) with an open access was used]

полоса из молодых сосен, которые заселились здесь самостоятельно. В результате этого процесса опушки молодого и старого лесов по внешнему виду практически перестали различаться (рис. 2, нижняя панель). Почва в лесах была дерново-подзолистой, а по механическому составу – песчаной или супесчаной. Расположение мест, использованных для наблюдений, измерений и пробоотбора, оконтурено окружностями на рисунке 1. Примерный центр окружности (диаметр около 100 м) имеет координаты (52,4703° с.ш., 31,7904° в.д.) и (52,4702° с.ш., 31,7883° в.д.) для площадки в молодом лесу и старом лесу соответственно.

Для измерений мощности экспозиционной дозы (МЭД, мкР/ч) на высоте 1 м над поверхностью почвы в 1998–2001 гг. использовали дозиметр EL-1101, в 2002–2008 гг. – дозиметр-радиометр бета-гамма-излучения EL-1117 (АТОМТЕХ, Беларусь). В 2009–2020 гг. измерения мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения в воздухе (МАЭД, нЗв/ч) выполняли, используя дозиметр АТ-1121 (АТОМТЕХ).

Для измерений полевых спектров гамма-излучающих радионуклидов в 1998–2012 гг. применяли портатив-



Рис. 2. Общий вид молодого леса (у) и старого леса (о) в апреле 2001 г., августе 2015 г. и сентябре 2022 г. Детектор гамма-спектрометра СКИФ-3 (2001 г.) и АТ-6101Д (2015 г.) вывешен на треноге на высоте 1 м от поверхности почвы
[Fig. 2. General view of young forest (y) and old forest (o) in April 2001, August 2015 and September 2022. The detector of the gamma spectrometer SKIF-3 (2001) and AT-6101D (2015) is fastened on a tripod at a height of 1 m from the ground surface]

ный сцинтилляционный спектрометр-дозиметр гамма- и рентгеновского излучения СК1 «СКИФ» (СИНКО, Россия), а в 2015 и 2020 гг. – портативный гамма-спектрометр-дозиметр АТ-6101Д (АТОМТЕХ). Для измерения спектра детектор и анализатор размещали на алюминиевом треножке (рис. 2, верхние и средние панели). Расстояние между центром кристалла NaI(Tl) и поверхностью почвы

было равно 1 м. По результатам анализа спектров, измеренных СК1 «СКИФ», вычисляли мощность поглощенной дозы (МПД_{662} , нГр/ч), обусловленную первичными фотонами с энергией 662 кэВ от ^{137}Ba (дочерний продукт распада ^{137}Cs), и мощность поглощенной дозы от природных радионуклидов (^{40}K , семейства ^{226}Ra и ^{232}Th) ($\text{МПД}_{\text{ПРН}}$, нГр/ч) [9]. При анализе спектров АТ-6101Д раздельно вы-

числяли МАЭД от всех фотонов (первичных и рассеянных) от ^{137}Cs – $^{137\text{m}}\text{Ba}$ (МАЭД_с) и от природных радионуклидов (МАЭД_п), а также МАЭД от первичных фотонов с энергией 662 кэВ от $^{137\text{m}}\text{Ba}$ (МАЭД₆₆₂) [10].

Статистическая неопределенность измерений и вычислений МЭД, МПД_с, МАЭД, МАЭД_с и МАЭД₆₆₂ не превышала 5% (95% вероятность); для МПД_п и МАЭД_п эта неопределенность была в пределах 20%. В соответствии с руководствами по эксплуатации приборов предел допускаемой основной погрешности измерений мощности дозы для EL-1101, EL-1117 и АТ-1121 равен 15%, а для АТ-6101Д – 20%. Для совместимости результатов, полученных на протяжении весьма длительного периода времени разными приборами, мы последовательно проводили сличительные измерения в парах EL-1101/EL-1117, EL-1117/АТ-1121, АТ-1121/СК1«СКИФ» и АТ-1121/АТ-6101Д [9]. В конечном счете все результаты были приведены к мощности поглощенной дозы (МПД, нГр/ч) при условии измерений с помощью начального дозиметра EL-1101 [9]. МАЭД_с пересчитывали в мощность поглощенной дозы от ^{137}Cs (МПД_с, нГр/ч) с помощью коэффициента перехода, равного 0,8 Гр/Зв для старого леса и 0,77 Гр/Зв для молодого леса. Эти численные средние значения были экспериментально определены для старых лесов и пахотных полей Брянской области [9]. Было принято допущение, что значения коэффициента перехода от МАЭД_с к МПД_с не менялись по мере роста леса.

Отбор проб почвы в 1998, 2004, 2012 и 2015 гг. проводили с помощью стального разборного цилиндрического пробоотборника длиной 20 см и с внутренним диаметром 5 см. Керны (7 проколов почвы на площадке) делили по глубине на слои толщиной 2 см или 5 см. Самый верхний слой включал в себя лесную подстилку. В 2022 г. для взятия почвы использовали цилиндрический пробоотборник длиной 15 см и с диаметром 4 см. Подстилку отбирали отдельно от почвы.

Для изучения распределения ^{137}Cs в органах сосны на площадках в 2004 г. было спилено по одному дереву; возраст деревьев был равен 10 годам. Для анализа была взята древесина, луб, кора и иглы первого и второго годов роста. В 2012 и 2015 гг. с молодых сосен одинакового возраста (по 3 близко стоящих дерева на каждой площадке в год) отбирали живые иглы. В разные годы для отбора использовали разные деревья.

В августе 2016 г. в старом и в молодом лесу были обнаружены немногочисленные плодовые тела 2 видов съедобных грибов – масленок (род *Suillus*) и подберезовик (род *Leccinum*). Немедленно после сбора плодовые тела (по 3–4 штуки на каждый вид на площадке) очищали от опада и земли.

В лаборатории пробы почвы и биоты высушивали до постоянного веса.

Активность ^{137}Cs (Бк) в счетных образцах измеряли с использованием стационарных сцинтилляционных и полупроводниковых гамма-спектрометров. Общая неопределенность измерения активности в пробе не превышала 15% (95% вероятность).

На основании экспериментально определенной активности ^{137}Cs в счетном образце и массы пробы (аликвоты) вычисляли удельную активность (УА, Бк/кг; на сухой вес). Для почвы вычисляли плотность загрязнения (запас) ^{137}Cs в каждом слое по отдельности и для всех слоев в сумме

(А_с, кБк/м²). Все значения УА и А_с были пересчитаны на день отбора с учетом радиоактивного распада ^{137}Cs .

Агрегированный коэффициент перехода ^{137}Cs из почвы в биоту (Tag, м²/кг [11]) вычисляли путем деления УА ^{137}Cs в пробе биоты на А_с в верхнем 20-сантиметровом слое почвы, отобранной в тот же год, что и проба биоты, за исключением грибов. Этот вид биопроб удалось получить в обоих лесах только в 2016 г., когда почву не отбирали. Поэтому величина А_с в 2016 г. была определена как средняя от значений А_с, полученных в 4 предыдущих обследованиях (в 1998, 2004, 2012 и 2015 гг.) с учетом радиоактивного распада ^{137}Cs .

Компонент годовой эффективной дозы внешнего облучения (E_{ext} , мЗв/год), обусловленный пребыванием человека в лесу, вычисляли по алгоритму и формулам из работы [12]. Компонент годовой эффективной дозы внутреннего облучения (E_{int} , мЗв/год), обусловленного поступлением ^{137}Cs в организм человека при потреблении грибов из леса, вычисляли по методике [13]. Для перехода от УА ^{137}Cs на сухой вес к УА ^{137}Cs на сырой вес использовали понижающий безразмерный коэффициент, равный 10 [14]. Учитывая значительную вариабельность массы грибов, потребляемых в год [15], мы включили в расчет два значения: 1 и 10 кг (сырой вес).

Результаты исследования и обсуждение

В 1998 г. значения МПД в пределах окружности (см. рис. 1) в молодом лесу варьировали от 296 до 418 нГр/ч (среднее значение $\pm$ стандартное отклонение = 383 ± 35 нГр/ч; $n = 9$). В старом лесу, по сравнению с новым лесом, среднее значение МПД было в 3 раза больше: 1160 ± 60 нГр/ч (разброс от 1040 до 1240 нГр/ч; $n = 9$). По результатам этого обследования на каждой площадке было выбрано по одной референтной точке, в которой значение МПД было близко к среднему значению МПД по площадке. Эти точки использовали для регулярных измерений в дальнейшем. В 1999–2008 гг. место измерения определяли по деревянным колышкам, вбитым в землю в 1998 г. С 2009 г. определение точки для измерения проводили с использованием бытовых GPS-навигаторов компании Garmin International (Olathe, KS, USA).

Значения МПД_п в молодом лесу и старом лесу совпадали друг с другом и составили 15 нГр/ч. Подавляющая часть (92% в молодом лесу и 97% в старом лесу) от общей МПД в 1998 г. была обусловлена гамма-излучением от радионуклидов цезия – ^{137}Cs и ^{134}Cs . По оценкам [16] вклад излучения от ^{134}Cs в МПД_с в Брянской области в 1996 г. был на уровне 3%, а к 2003 г. этот показатель упал ниже 1%, т.е. стал пренебрежимо малым.

В старом лесу в 1998 г. 68% МПД_с приходилось на нерассеянные гамма-кванты с энергией 662 кэВ от $^{137\text{m}}\text{Ba}$. В молодом лесу в это же время данный показатель был существенно ниже и составлял 41%, что косвенно свидетельствовало о культивации почвы в предыдущие годы и заглаблении источника излучения [17].

Графически динамика МПД_с в референтных точках в период 1998–2020 гг. приведена на рисунке 3. Для корректной и удобной локализации временной шкалы за нулевую точку взято 1 января 1998 г. Рисунок 3 показывает, что экспериментально установленное уменьшение МПД_с в обоих лесах может быть вполне удовлетворительно аппроксимировано экспоненциальной функцией:

$$DR_t = DR_0 \times \exp(-\lambda_{\text{eff}} \times t), \quad (3)$$

где DR_t – мощность дозы (нГр/ч) в момент времени t ; DR_0 – мощность дозы (нГр/ч) на начало года регулярных измерений (01.01.1998; $t = 0$); λ_{eff} – постоянная эффективного уменьшения мощности дозы, год^{-1} [18]; t – время, прошедшее от момента 0 (год).

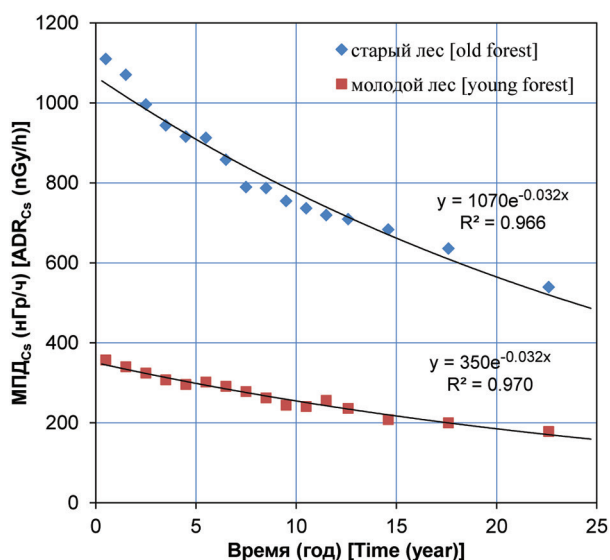


Рис. 3. Динамика мощности поглощенной дозы от $^{137}\text{Cs}+^{134}\text{Cs}$ (МПД_{cs}) в референтных точках в старом и молодом лесу в период 1998–2020 гг. За точку 0 на временной шкале принято 1 января 1998 г.

[Fig. 3.] Dynamics of absorbed dose rate from $^{137}\text{Cs}+^{134}\text{Cs}$ (ADR_{cs}) at reference points in old and young forests in the period 1998–2020. January 01, 1998 is defined as zero point on the time scale]

Величину λ_{eff} можно преобразовать в величину эффективного периода полууменьшения мощности дозы $T_{\text{eff}} = 0,693/\lambda_{\text{eff}}$ [18]. Для старого леса и молодого леса значение T_{eff} оказалось равным 21,7 года. В обоих случаях скорость уменьшения МПД_{cs} заметно превышала ту скорость, которая зависит от радиоактивного распада ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30,1$ года). Наблюдаемое на рисунке 3 отклонение некоторых экспериментальных точек от линии аппроксимации может быть связано как с переходом с одного дозиметра на другой, так и с локальной вариативностью гамма-поля и с некоторой неточностью воспроизведения положения детектора дозиметра на местности год от года. Еще одной причиной разброса точек вокруг линии аппроксимации могли быть погодные условия и вариативность содержания воды в почве.

Соотношение между значениями МПД_{cs} в старом лесу и молодом лесу незначительно варьировало год от года: от 2,81 до 3,28 (средняя = 3,05). Эта величина не коррелировала со временем, прошедшим с момента начала измерений (тест Спирмана, $P > 0,05$), что подтверждалось равенством значений T_{eff} в старом и молодом лесу. На протяжении всего времени наблюдений вклад первичных фотонов с энергией 662 кэВ от $^{137\text{m}}\text{Ba}$ в МПД_{cs} в старом лесу превышал 50% (разброс от 59 до 68%). В молодом лесу на протяжении всего периода наблюдений этот вклад в МПД_{cs} всегда был меньше 50% (39–44%).

Значения УА ^{137}Cs в послойно отобранных пробах почвы ($n = 40$) из старого леса находились в диапазоне от $15,6 \pm 2,3$ Бк/кг до $52\,600 \pm 6300$ Бк/кг (на сухой вес). Обнаруженная вариативность связана с неравномерным вертикальным распределением УА ^{137}Cs : максимальные значения во все годы были в верхнем 2-сантиметровом слое (рис. 4). Данный слой включал в себя в основном лесную подстилку и немного неорганического материала. С глубиной УА ^{137}Cs уменьшалась. Принципиальных изменений в форме вертикального распределения УА ^{137}Cs в зависимости от времени, прошедшего с момента аварии на ЧАЭС, не наблюдалось. Форма вертикального распределения УА ^{137}Cs в почве в старом лесу в целом совпадала с теми распределениями, которые были обнаружены другими авторами в почве радиоактивно загрязненных старых лесов в 1996–2001 гг. в Брянской области России [16] и в 2016–2018 гг. в Гомельской области Беларуси [19].

В молодом лесу, по сравнению со старым лесом, разброс УА ^{137}Cs в пробах ($n = 42$) был заметно уже: от $14,5 \pm 2,2$ Бк/кг до 2980 ± 360 Бк/кг (на сухой вес). Распределение значений УА ^{137}Cs в верхних 20 см почвы во все годы отбора было практически равномерным; далее с глубиной, как показали отборы 1998 и 2012 гг., этот показатель резко снижался (см. рис. 4). При этом нарастания УА ^{137}Cs на глубине 25–30 см с 1998 г. ($14,5 \pm 2,2$ Бк/кг) до 2012 г. ($15,2 \pm 2,3$ Бк/кг) не произошло. Вертикальное распределение УА ^{137}Cs в почве молодого леса в 1998 г. удовлетворительно соответствовало усредненному распределению УА ^{137}Cs в почве пахотных полей в Брянской области в 1996–2001 гг. [16]. Это является дополнительным инструментальным подтверждением того, что участок в Муравинке неоднократно перепаживался после Чернобыльской аварии. Интересно отметить, что в 2012 г. значения УА ^{137}Cs на глубине 25–30 см в молодом и старом лесу совпадали друг с другом (около 15 Бк/кг) (см. рис. 4, левая нижняя панель). Данная величина на 2–3 порядка ниже, чем УА ^{137}Cs в верхних слоях почвы, что свидетельствует о весьма ограниченной миграции радионуклида в этот глубокий слой на обеих площадках.

Значения запаса ^{137}Cs , вычисленные для верхнего 20-сантиметрового слоя почвы (A_{cs}) на отдельных точках на дату отбора, приведены в таблице 1. Вариативность данного показателя в значительной мере определяется временем, прошедшим с момента выпадений, и соответственно, распадом ^{137}Cs . Если пересчитать эти значения A_{cs} на момент Чернобыльской аварии (26.04.1986), то разброс между точками отбора внутри каждой площадки существенно уменьшится: 1150–1180 кБк/м² (средняя 1170 кБк/м²) для молодого леса и 950–1340 кБк/м² (средняя 1190 кБк/м²) для старого леса. Как видно, средние величины запаса ^{137}Cs в верхнем 20-сантиметровом слое в молодом лесу и старом лесу совпадают между собой. Пересчитанные на 1986 г. значения A_{cs} в почве в лесах около Муравинки очень хорошо соответствуют официально установленному на 1986 г. значению плотности загрязнения почвы ^{137}Cs в данном населенном пункте – 1133 кБк/м² [8].

В старом лесу подавляющая доля A_{cs} приходилась на верхние 4 см почвы: 88% в 1998 г. (см. табл. 1). К 2015 г. эта доля несколько уменьшилась: до 82%. Изменений со временем доли A_{cs} в верхних 10 см не произошло: здесь содержалось более 95% запаса. На глубине 20–30 см

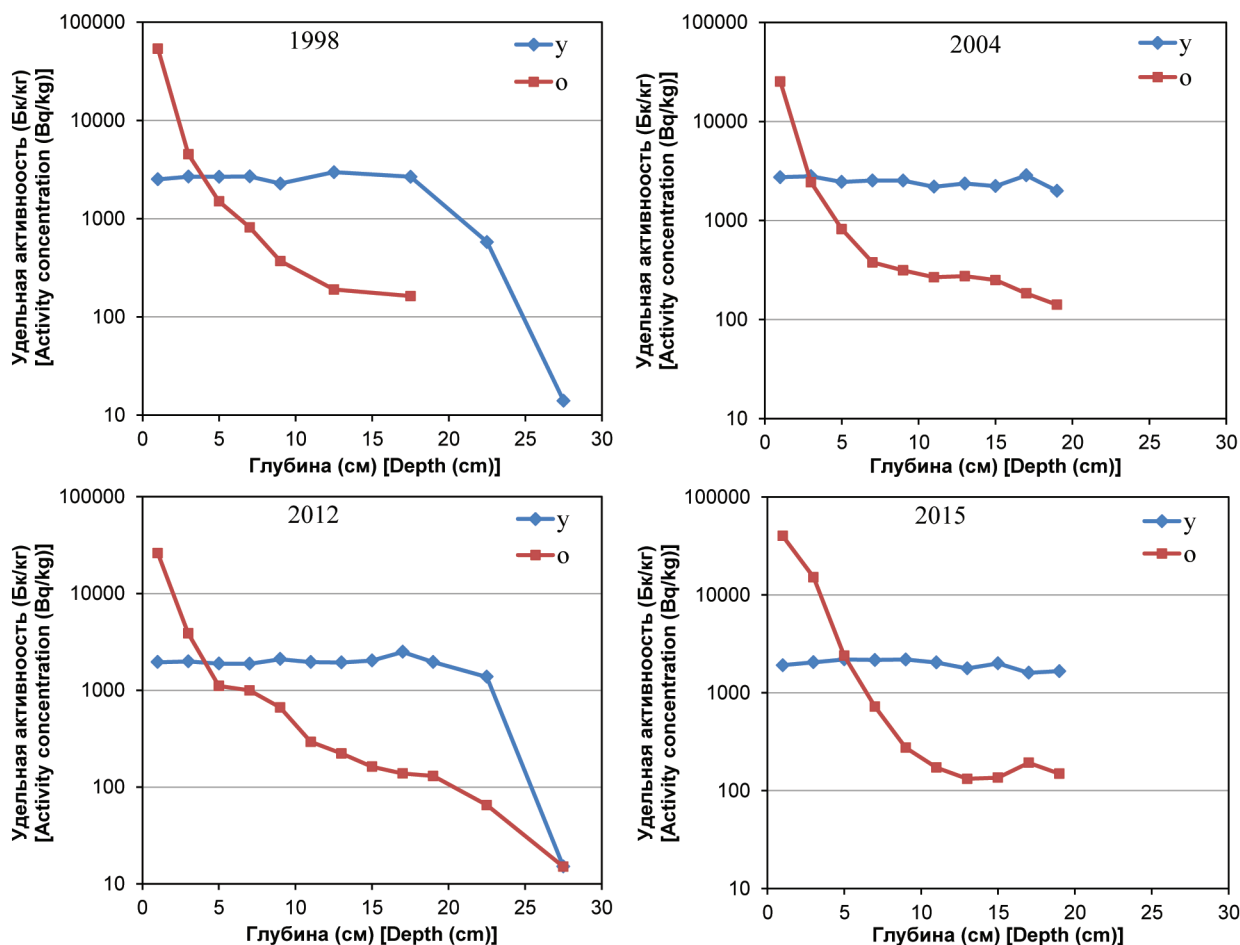


Рис. 4. Распределение удельной активности ^{137}Cs (на сухой вес) по вертикали в почве молодого леса (y) и старого леса (o) в 1998, 2004, 2012 и 2015 гг.

[Fig. 4. Vertical distribution of the ^{137}Cs activity concentration (dry weight) in the soil of young forest (y) and old forest (o) in 1998, 2004, 2012, and 2015]

Таблица 1

Запас ^{137}Cs в верхнем 20-сантиметровом слое почвы (A_{Cs}), а также доли A_{Cs} в верхнем 4-сантиметровом слое ($pA_{\text{Cs-4}}$) и 10-сантиметровом слое ($pA_{\text{Cs-10}}$) на участках, которые расположены в молодом лесу и старом лесу вблизи НП Муравинка

[Table 1

Inventory of ^{137}Cs in the upper 20-cm soil layer (A_{Cs}), as well as the portion of A_{Cs} in the upper 4-cm layer ($pA_{\text{Cs-4}}$) and 10-cm layer ($pA_{\text{Cs-10}}$) in plots that are located in the young forest and old forest near Muravinka]

Параметр [Parameter]	Старый лес [Old forest]				Молодой лес [Young forest]			
Год [Year]	1998	2004	2012	2015	1998	2004	2012	2015
A_{Cs} (кБк/м ²) [(kBq/m ²)]	842	624	724 (730*)	682	886 (923*)	775	639 (740*)	582
$pA_{\text{Cs-4}}$ (%)	88	86	84	82	19	24	19	12
$pA_{\text{Cs-10}}$ (%)	97	94	96	96	47	53	47	45

* – запас в верхних 30 см [* – inventory in the upper 30 cm.]

в 2012 г. залегало менее 1% (6 кБк/м²) от A_{Cs} (724 кБк/м²). В молодом лесу в этом же году на такой глубине содержалось около 16% (101 кБк/м²) от запаса ^{137}Cs (639 кБк/м²), находящего в верхних 20 см, причем из этих 101 кБк/м² лишь малая часть (менее 2 кБк/м²) была в слое глубиной 25–30 см.

По УА ^{137}Cs в лесной подстилке исследуемые площадки характеризуются принципиально разными уров-

нями загрязнения: 449 ± 54 Бк/кг (на сухой вес) в молодом лесу и $14\,800 \pm 1800$ Бк/кг в старом лесу по данным отбора 2022 г. Лесная подстилка в молодом лесу начала формироваться спустя много лет после аварии на ЧАЭС. Поэтому содержание ^{137}Cs в этом компоненте экосистемы в молодом лесу определяется в основном содержанием радионуклида в опаде с деревьев, которые загрязнены ^{137}Cs , поступающим из почвы через корни. В молодом

лесу в 15-сантиметровом слое почвы под подстилкой УА ^{137}Cs (2750 ± 330 Бк/кг на сухой вес) была в 6 раз больше по сравнению с таковой в подстилке. Напротив, в старом лесу УА ^{137}Cs в почве (1730 ± 210 Бк/кг) была в 8 раз меньше, чем в подстилке.

Исследование органов и тканей молодых сосен в июле 2004 г. показало весьма неравномерное распределение ^{137}Cs в растении (табл. 2). Вместе с тем, картины распределения радионуклида в деревьях из старого леса и молодого леса были одинаковыми: максимальные значения УА ^{137}Cs были определены в иглах первого года роста, а минимальные – в древесине. Однако в отношении абсолютных значений два леса расходились весьма

показательно: в пробах из старого леса УА ^{137}Cs была в 4–10 раз больше. Разница по показателю Tag между площадками также была весьма выраженной: в 5–13 раз в зависимости от органа/ткани. Последующие обследования в 2012 и 2015 гг. подтвердили существенно меньший (примерно на порядок величины) переход ^{137}Cs из почвы в растение в новом лесу по сравнению со старым лесом (см. табл. 2). Основной причиной таких различий может быть перепашка земли и изменение вертикального распределения ^{137}Cs в почве перед посадкой нового леса. Ранее на такую причину указывали Fogh и Andersson [20], изучившие динамику поведения ^{137}Cs в деревьях в Брянской области в 1997 г. По их данным, значения Tag

Таблица 2

Удельная активность ^{137}Cs (на сухой вес) в пробах биоты, в старом лесу (AC-o) и в молодом лесу (AC-y), а также агрегированные коэффициенты перехода ^{137}Cs в паре почва – биота в старом лесу (Tag-o) и в молодом лесу (Tag-y), которые расположены вблизи НП Муравинка

[Table 2]

Activity concentration of ^{137}Cs (dry weight) in the biota samples collected in the old forest (AC-o) and in the young forest (AC-y), as well as soil-to-biota aggregated transfer coefficient for ^{137}Cs in the old forest (Tag-o) and in the young forest (Tag-y), which are located near Muravinka

Проба [Sample]	AC-o (Бк/кг) [AC-o (Bq/kg)]*	AC-y (Бк/кг) [AC-y (Bq/kg)]*	AC-o/ AC-y	Tag-o ($\text{m}^2/\text{кг}$, $\text{n} \times 10^{-3}$) [Tag-o ($\text{m}^2/\text{кг}$, $\text{n} \times 10^{-3}$)]	Tag-y ($\text{m}^2/\text{кг}$, $\text{n} \times 10^{-3}$) [Tag-y ($\text{m}^2/\text{кг}$, $\text{n} \times 10^{-3}$)]	Tag-o/Tag-y
27.07.2004						
Иглы первого года [Needles-1y]	6680	652	10	11	0,84	13
Иглы второго года [Needles-2y]	913	141	6,5	1,5	0,18	8,0
Кора (ствол дерева) [Bark (trunk of tree)]	494	117	4,2	0,79	0,15	5,2
Луб (ствол дерева) [Bast (trunk of tree)]	1490	266	5,6	2,4	0,34	6,9
Древесина (ствол) [Wood (trunk)]	215	36,1	5,9	0,34	0,047	7,4
14.06.2012						
Иглы первого года [Needles-1y]	8680	276	31	12	0,43	28
Иглы второго года [Needles-2y]	1500	62,9	24	2,1	0,10	21
14.08.2015						
Иглы первого года [Needles-1y]	3600	179	20	5,3	0,31	17
Иглы второго года [Needles-2y]	783	41,7	19	1,2	0,072	16
Иглы третьего года [Needles-3y]	589	42,7	14	0,86	0,073	12
Кора (сухие ветви) [Bark (dry branches)]	192	27,9	6,9	0,28	0,048	5,9
04.08.2016						
Грибы (<i>Leccinum</i> sp.) [Mushrooms (<i>Leccinum</i> sp.)]	57 300	7630	7,5	93	13	7,4
Грибы (<i>Suillus</i> sp.) [Mushrooms (<i>Suillus</i> sp.)]	71 000	4670	15	120	8,0	15

* – статистическая неопределенность вычисления площади пика полного поглощения с энергией 662 кэВ не превышала 7% (95% вероятность). [* – the statistical uncertainty of the calculation of the 662 keV full energy peak area did not exceed 7% (95% probability).]

для ^{137}Cs в молодой сосне (возраст 10 лет) из леса, посаженного на поле, которое было перепахано вскоре после аварии на ЧАЭС, оказались в 11 раз (иглы первого года роста) и в 17 раз (древесина) меньше, чем таковые в зрелой сосне (возраст 45 лет) из рядом расположенного старого леса вблизи н.п. Заборье. Конечно, при этом нельзя было исключить какую-то положительную зависимость величины Tag от возраста растения. Как показывают результаты исследования Fesenko et al. [21], выполненного также в Брянской области в 1996–1998 гг., значение Tag для ^{137}Cs в иглах первого года в сосне в возрасте 11 лет по сравнению с сосной в возрасте 50 лет было в 2 раза меньше. Для древесины этих деревьев, которые росли на одном и том же лесном участке вблизи н.п. Ст. Бобовичи, различия были трехкратными. Абсолютные значения Tag ^{137}Cs для молодой сосны в возрасте 11 лет из старого леса около Ст. Бобовичей были равны $15,5 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$ в иглах первого года роста и $0,35 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$ в древесине [21]. Эти значения вполне соответствуют нашим оценкам Tag ^{137}Cs для молодой сосны в возрасте 10 лет из старого леса вблизи Муравинки: $11 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$ в иглах 1-го года и $0,34 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$ в древесине (см. табл. 2). В то же время наши оценки коэффициентов перехода ^{137}Cs из почвы в молодое дерево (10 лет) на перепаханном участке в Муравинке в 2004 г. ($0,84 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$ для игл первого года и $0,047 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$ для древесины) были примерно в 2 раза меньше тех значений Tag ^{137}Cs ($1,7 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$ для игл первого года и $0,11 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$ для древесины), которые выведены Fogh и Andersson [20] для молодой сосны (возраст 10 лет), произраставшей на перепаханном поле в Заборье в 1997 г. Следует признать эту разницу сравнительно небольшой, так для периода времени, который характеризуется условно стабильными параметрами миграции радионуклида в лесной экосистеме (среднесрочный и отдаленный период после загрязнения), разброс значений Tag ^{137}Cs , выведенных разными авторами для одних и тех же органов сосны, превышает порядок вели-

чины [11]. Отметим, что во всех обозначенных выше лесах вблизи Муравинки, Ст. Бобовичей и Заборья почва была песчаной или супесчаной. Отсутствие различий между лесами по типу почвы является одной из причин удовлетворительной сходимости значений Tag ^{137}Cs в сосне, выведенных в работах [20, 21] и в нашем исследовании.

Из таблицы 2 видно, что уровни загрязнения ^{137}Cs грибов, произрастающих в молодом лесу, многократно ниже, чем грибов из соседнего старого леса. Пропорционально меньше были и значения коэффициента перехода ^{137}Cs из почвы в грибы. Наши оценки Tag ^{137}Cs для грибов, отобранных в старом лесу ($120 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$ для рода *Suillus* и $93 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$ для рода *Leccinum*), были в пределах диапазонов значений Tag ^{137}Cs (на сухой вес), приведенных в представительной сводке документа МАГАТЭ TRS-472 [11] для грибов рода *Suillus* (минимум = $70 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$, максимум = $3,0 \text{ м}^2/\text{кг}$) и *Leccinum* (минимум = $0,8 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$, максимум = $1,1 \text{ м}^2/\text{кг}$). Выраженная вариабельность Tag ^{137}Cs из почвы в грибы отражает как способность того или вида (рода) накапливать радионуклиды, так и особенности физико-химических свойств почвы в тех лесах, где растут грибы [11, 22]. Как показывают наши исследования, в настоящее время для изучения причин изменчивости Tag ^{137}Cs для грибов есть смысл учитывать и возраст леса. Однако этот аспект нуждается в дополнительном исследовании.

В качестве примера «лесной» компонент ожидаемой годовой эффективной дозы от ^{137}Cs был вычислен на 2016 г., летом которого были отобраны пробы грибов, и в них была определена УА ^{137}Cs . Результаты вычисления этого компонента годовой эффективной дозы для 3 групп местного населения – работников лесного хозяйства, неработающих пенсионеров и работающих взрослых – приведены в таблице 3.

Оцененные значения суммарной дозы облучения ($E_{\text{ext}} + E_{\text{int}}$) для ситуации использования старого леса варьировали от 0,059 до 0,95 мЗв/год в зависимости от груп-

Таблица 3

Ожидаемые годовые эффективные дозы внешнего облучения (E_{ext}) от источника ^{137}Cs на лесном участке и внутреннего облучения (E_{int}) от ^{137}Cs при потреблении лесных грибов (1 и 10 кг в год, сырой вес) в 2016 г. Оценки даны для старого и молодого лесов, расположенных вблизи НП Муравинка

[Table 3]

Estimated annual external effective doses (E_{ext}) from the ^{137}Cs source in the forest area and annual internal effective doses (E_{int}) from ^{137}Cs due to consumption of wild mushrooms (1 and 10 kg per year, wet weight) in 2016. The estimates are provided for the old and young forests located near Muravinka]

Лесной участок [Forest plot]	Эффективная доза (мЗв/год) [Effective dose (mSv/year)]				
	E_{ext}	E_{int}		$E_{ext} + E_{int}$	
		1 кг [1 kg]	10 кг [10 kg]	1 кг [1 kg]	10 кг [10 kg]
Лесники [Foresters]					
Старый [Old]	0,53	0,042	0,42	0,57	0,95
Молодой [Young]	0,17	0,0040	0,040	0,18	0,21
Неработающие пенсионеры [Non-working pensioners]					
Старый [Old]	0,033	0,042	0,42	0,075	0,45
Молодой [Young]	0,011	0,0040	0,040	0,015	0,051
Работающие взрослые [Working adults]					
Старый [Old]	0,017	0,042	0,42	0,059	0,44
Молодой [Young]	0,0054	0,0040	0,040	0,0094	0,045

пы населения (или времени пребывания в лесу) и массы потребляемых грибов. При этом основной вклад в дозу облучения у лесников (время пребывания в лесу 1400 ч) вносило внешнее облучение: 93% при потреблении 1 кг грибов и 56% при потреблении 10 кг грибов. Для неработающих пенсионеров (время пребывания в лесу 88 ч) и в особенности для работающих взрослых (время нахождения в лесу 44 ч) доза внешнего облучения играла существенно меньшую роль: диапазон 4–44%. Суммарная доза облучения для рассматриваемого сценария использования молодого леса, по сравнению со старым лесом, была в 3–10 раз меньше. У лесников E_{ext} абсолютно доминировала в общей дозе и составляла от 81 до 98%. Для 2 других групп населения вклад дозы внешнего облучения в $E_{ext} + E_{int}$ варьировал от 12% (работающие взрослые при потреблении 10 кг грибов) до 73% (неработающие пенсионеры при потреблении 1 кг грибов).

Следует отметить, что выведенные оценки обладают разной неопределенностью для разных групп населения. В частности, вполне возможно, что в неурожайный (в отношении грибов) год продолжительность посещения лесов основными группами населения (за исключением лесников) будет заметно меньше тех значений, которые мы использовали в вычислениях. Для работников лесного хозяйства приведенные оценки являются более определенными, т.к. пребывание этой группы населения в лесу связано с выполнением профессиональных обязанностей.

Заключение

Сравнительные долговременные (1998–2022 гг.) наблюдения за показателями радиационной обстановки в молодом лесу, выросшем после Чернобыльской аварии на землях сельскохозяйственного назначения, и в старом лесу, сформировавшемся еще до Чернобыльской аварии, выявили как общие черты, так и существенные различия. На обследованных участках сходным является тип почвы (дерново-подзолистый супесчаный), запас ^{137}Cs в верхнем 20-сантиметровом слое почвы (около 1200 кБк/м² в пересчете на 1986 г.) и мощность поглощенной дозы в воздухе от природных радионуклидов (около 15 нГр/ч). Вместе с тем, участки принципиально различались по типу вертикального распределения ^{137}Cs в почве. В молодом лесу ^{137}Cs в верхнем 20-сантиметровом слое почвы был распределен довольно равномерно; далее с глубиной, как показали отборы 1998 и 2012 гг., удельная активность ^{137}Cs резко снижалась. В старом лесу максимум УА ^{137}Cs в почве во все годы был зарегистрирован в самом верхнем слое 0–2 см. С глубиной УА ^{137}Cs уменьшалась. На обоих участках отчетливых изменений в форме вертикального распределения УА в зависимости от времени, прошедшего с момента аварии на ЧАЭС, не было отмечено. В 1998 г. в старом лесу, по сравнению с новым лесом, среднее значение мощности поглощенной дозы в воздухе от ^{137}Cs (МПД_{Cs}) было в 3 раза больше, что связано с различиями в вертикальном распределении ^{137}Cs в почве. Со временем МПД_{Cs} на обоих участках снижалась с одинаковым эффективным периодом полууменьшения, равным 21,7 года. Удельная активность ^{137}Cs в биоте (сосна, съедобные грибы) в молодом лесу, по сравнению со старым лесом, была в 4–30 раз меньше; наибольшая разница была обнаружена в отношении игл сосны, а наименьшая –

коры сосны. Такой же вывод можно сделать и для значений агрегированного коэффициента перехода (Tag) ^{137}Cs из почвы в биоту.

Компонент годовой эффективной дозы внешнего облучения взрослого человека от источника ^{137}Cs в молодом лесу был в 3 раза меньше, чем таковой в старом лесу. Оцененная доза внутреннего облучения от ^{137}Cs при потреблении съедобных грибов из молодого леса, по сравнению со старым, была в 10 раз меньше. Имея в виду большую разницу между исследованными лесами в значениях Tag ^{137}Cs для сосны, есть все основания полагать, что в будущем дозы облучения человека, обусловленные использованием деловой древесины и дров из молодого леса, будут существенно меньше по сравнению с теми дозами, которые сформируются при использовании соответствующей продукции из старого леса.

В целом, выполненное исследование показывает, что использование радиоактивно загрязненных заброшенных пахотных земель для лесоводства может оказаться весьма целесообразным и оправданным с радиологической точки зрения. Для подтверждения сделанных выводов следует провести оценку радиационной обстановки на других участках бывших сельскохозяйственных земель, заросших или засаженных древесными видами растений.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Рамзаев В.П. – концепция, измерения, написание рукописи.

Барковский А.Н. – концепция, редактирование рукописи.

Варфоломеева К.В. – измерения.

Некрасов В.А. – измерения.

Благодарности

Авторы использовали изображение с открытым исходным кодом с сайта FIRMS NASA (<https://earthdata.nasa.gov/firms>).

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Финансирование работы частично осуществлялось по контракту № 0173100001419000019 с Роспотребнадзором.

Литература

1. Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience. Report of the Chernobyl Forum Expert Group 'Environment'. IAEA, Vienna, 2006.
2. Российский национальный доклад: 35 лет Чернобыльской аварии. Итоги и перспективы преодоления ее последствий в России. 1986–2021. Под общ. ред. Л.А. Большова; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук. М.: Академ-Принт, 2021.
3. Шубина О.А., Титов И.Е., Кречетников В.В., Санжарова С.И. Вопросы возвращения в хозяйственное использование территорий, временно выведенных из землепользования после аварии на ЧАЭС. "Актуальные вопросы радиозащиты". Труды Федерального государственного

- бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии» (ФГБНУ ВНИРАЭ). Под ред. Н.И. Санжаровой. Обнинск, 2018. С. 99–119.
4. Hostert P., Kuemmerle T., Prishchepov A., et al. Rapid land use change after socio-economic disturbances: the collapse of the Soviet Union versus Chernobyl // *Environmental Research Letters*. 2011. Vol. 6. P. 045201.
 5. Matsala M., Bilous A., Myroniuk V., et al. The return of nature to the Chernobyl Exclusion Zone: increases in forest cover of 1.5 times since the 1986 disaster // *Forests*. 2021. Vol. 12. P. 1024.
 6. Радиационно-гигиенические аспекты преодоления последствий аварии на Чернобыльской АЭС. Под ред. академика РАН Г.Г. Онищенко и профессора А.Ю. Поповой. СПб.: НИИРГ имени проф. П.В. Рамзаева, 2016. Т. 1. 448 с.
 7. Hashimoto S., Komatsu M., Miura S. Impacts of Radioactive Contamination of Forest on Life. In: *Forest Radioecology in Fukushima*. 2022. Springer, Singapore. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-16-9404-2_6 (Дата обращения: 10.12.2022).
 8. Накопленные средние эффективные дозы // *Радиация и риск*. 1999. Спецвыпуск 1. С. 20.
 9. Ramzaev V.P., Barkovsky A.N. On the relationship between ambient dose equivalent and absorbed dose in air in the case of large-scale contamination of the environment by radioactive cesium // *Radiation Hygiene*. 2015. Vol. 8, No. 3. P. 6–20.
 10. Ramzaev V., Bernhardsson C., Dvornik A., et al. *In situ* determination of ^{137}Cs inventory in soil using a field-portable scintillation gamma spectrometer-dosimeter // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021. Vol. 231. P. 106562.
 11. IAEA – International Atomic Energy Agency. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments; Technical Report Series No. 472. Vienna. 2010.
 12. Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Братилова А.А., и др. Оценка годовой эффективной дозы внешнего облучения в лесах юго-западных районов Брянской области России: 2015–2021 гг. // *Радиационная гигиена*. 2022. Т. 15, № 3. С. 58–71.
 13. Травникова И.Г., Брук Г.Я., Шутов В.Н., Базюкин А.В. Пути формирования доз внутреннего облучения сельских жителей Брянской области после аварии на ЧАЭС (Часть первая) // *Радиационная гигиена*. 2013. Т. 6., № 2. С. 11–20.
 14. Falandysz J., Meloni D., Fernandes A.R., Saniewski M. Effect of drying, blanching, pickling and maceration on the fate of ^{40}K , total K and ^{137}Cs in bolete mushrooms and dietary intake // *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29. P. 742–754.
 15. Панов А.В., Марочкина Е.В., Пономаренко В.В. О роли грибов в формировании доз внутреннего облучения населения, проживающего на радиоактивно загрязненных вследствие аварии на ЧАЭС территориях // *Радиационная гигиена*. 2014. Т. 7, № 1. С. 63–70.
 16. Ramzaev V., Yonehara H., Hille R., et al. Gamma-dose rates from terrestrial and Chernobyl radionuclides inside and outside settlements in the Bryansk Region, Russia in 1996–2003 // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006. Vol. 85. P. 205–227.
 17. Рамзаев В.П., Барковский А.Н. Метод идентификации участков целинных почв с помощью портативного гамма-спектрометра-дозиметра // *Радиационная гигиена*. 2020. Т. 13, № 2. С. 123–128.
 18. Рамзаев В.П., Барковский А.Н. Динамика уменьшения мощности дозы гамма-излучения в воздухе в сельских населенных пунктах Брянской области России в отдаленном периоде после Чернобыльской аварии // *Радиационная гигиена*. 2020. Т. 13, № 1. С. 38–46.
 19. Ramzaev V., Bernhardsson C., Dvornik A., et al. Calculation of the effective external dose rate to a person staying in the resettlement zone of the Vetka district of the Gomel region of Belarus based on *in situ* and *ex situ* assessments in 2016–2018 // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020. Vol. 214–215. P. 106168.
 20. Fogh C.L., Andersson K.G. Dynamic behaviour of ^{137}Cs contamination in trees of the Bryansk region, Russia // *Science of the Total Environment*. 2001. Vol. 269. P. 105–115.
 21. Fesenko S.V., Soukhova N.V., Sanzharova N.I., et al. Identification of processes governing long-term accumulation of ^{137}Cs in forest trees following the Chernobyl accident // *Radiation and Environmental Biophysics*. 2001. Vol. 40. P. 105–113.
 22. Кадука М.В., Шутов В.Н., Брук Г.Я., Балонов М.И. Роль физико-химических свойств почвы в формировании радиоактивного загрязнения грибов // *Радиационная гигиена*. 2008. Т. 1, № 1. С. 32–35.

Поступила: 23.12.2022 г.

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

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

Варфоломеева Ксения Владимировна – младший научный сотрудник лаборатории 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, Санкт-Петербург, Россия

Некрасов Владислав Аркадьевич – младший научный сотрудник лаборатории внешнего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Варфоломеева К.В., Некрасов В.А. Радиационная обстановка в молодом сосновом лесу, выросшем после Чернобыльской аварии // *Радиационная гигиена*. 2023. Т. 16, № 1. С. 40–51. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-40-51

Radiological situation in the young pine forest that grew after the Chernobyl accident

Valery P. Ramzaev, Anatoly N. Barkovsky, Kseniya V. Varfolomeeva, Vladislav A. Nekrasov

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

After the Chernobyl accident, a certain proportion of agricultural land was withdrawn from normal use due to significant radioactive contamination. Forestry is one of the options currently under consideration to return the abandoned agricultural land to economic circulation in Russia. When using former agricultural land for forestry in radioactively contaminated areas, it is important to have an assessment of the potential radiation doses for forestry workers and the public. The aim of this study was to assess the radiological situation in a young pine forest planted and grown after the Chernobyl accident in the resettlement zone on a former arable field. A nearby old pine forest, which had grown before the Chernobyl accident, was taken for comparison. The study of the radiological situation was performed in the period 1998–2022. In the young forest, ^{137}Cs was fairly evenly distributed in the upper 20 cm soil layer; further with depth, the activity concentration of ^{137}Cs sharply decreased. In the old forest, the maximum activity concentration of ^{137}Cs in the soil was in the top 0–2 cm layer. The activity concentration of ^{137}Cs decreased with depth. In 1998, the average value of the absorbed dose rate in the air from $^{137}\text{Cs}+^{134}\text{Cs}$ was lower by a factor of 3 in the young forest compared to the old forest. The difference was associated with differences in the vertical distributions of ^{137}Cs in the soil. Over time, the absorbed dose rate in air from $^{137}\text{Cs}+^{134}\text{Cs}$ decreased at both sites with the same effective half-time period of 21.7 year. The activity concentration of ^{137}Cs in the biota (pine trees, edible mushrooms) in the young forest was lower by a factor of 4–30 compared to the old forest. The “forest” component of the external effective dose to adults from the ^{137}Cs source in the young forest was lower by a factor of 3 compared to the old forest. The “forest” component of the internal effective dose from ^{137}Cs was lower by a factor of 10 when eating edible mushrooms from the young forest compared to the old one. In general, the performed study shows that the use of radioactively contaminated abandoned arable land for forestry can be expedient and justified from a radiological point of view.

Key words: Chernobyl accident, abandoned agricultural land, forestry, soil, pine, mushrooms, effective dose, ^{137}Cs .

Personal participation of authors

V.P. Ramzaev – conceptualization, measurements, writing the manuscript.

A.N. Barkovsky – conceptualization, editing the manuscript.

K.V. Varfolomeeva – measurements.

V.A. Nekrasov – measurements.

Acknowledgments

The authors used on-line and open-source image of the NASA's FIRMS (<https://earthdata.nasa.gov/firms>).

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Sources of funding

The work was partially financed under contract No. 0173100001419000019 with Rospotrebnadzor.

References

1. Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience. Report of the Chernobyl Forum Expert Group 'Environment'. IAEA, Vienna, 2006.
2. Russian National Report: 35 years of the Chernobyl Accident. Results and Prospects of Overcoming its Consequences in Russia. 1986-2021 / Ed.: L.A. Bolshov; the Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences. Moscow: Academ-Print; 2021. (In Russian).
3. Shubina OA, Titov IE, Krechetnikov VV, Sanzharova SI. Issues of return to economic use of territories temporarily withdrawn from land use after the Chernobyl accident. In: "Actual Problems of Radioecology". Proceedings of the Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology" (FGBNU VNIIRAE). Ed.: N.I. Sanzharova. Obninsk; 2018. P. 99–119. (In Russian).
4. Hostert P, Kuemmerle T, Prishchepov A, Sieber A, Lambin EF, Radeloff VC. Rapid land use change after socio-economic disturbances: the collapse of the Soviet Union versus Chernobyl. *Environmental Research Letters*. 2011;6: 045201.
5. Matsala M, Bilous A, Myroniuk V, Holiaka D, Schepaschenko D, See L, et al. The return of nature to the Chernobyl Exclusion Zone: increases in forest cover of 1.5 times since the 1986 disaster. *Forests*. 2021;12: 1024.
6. Radiological and Hygienic Issues of the Mitigation of the Chernobyl NPP Accident Consequences. Ed.: G.G. Onishchenko, A.Yu. Popova. St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev; 2016. Vol. 1, 448 p. (In Russian).

Valery P. Ramzaev

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

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

7. Hashimoto S, Komatsu M, Miura S. Impacts of Radioactive Contamination of Forest on Life. In: Forest Radioecology in Fukushima. 2022. Springer, Singapore. Available on: https://doi.org/10.1007/978-981-16-9404-2_6. (Accessed 10 December 2022).
8. Mean effective cumulated doses. *Radiatsia i risk = Radiation and Risk*. 1999. Special issue. (In Russian).
9. Ramzaev VP, Barkovsky AN. On the relationship between ambient dose equivalent and absorbed dose in air in the case of large-scale contamination of the environment by radioactive cesium. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(3): 6–20.
10. Ramzaev V, Bernhardtsson C, Dvornik A, Barkovsky A, Vodovatov A, Jönsson M. *In situ* determination of ^{137}Cs inventory in soil using a field-portable scintillation gamma spectrometer-dosimeter. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021;231: 106562.
11. IAEA – International Atomic Energy Agency. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments; Technical Report Series No. 472. Vienna. 2010.
12. Ramzaev VP, Barkovsky AN, Bratilova AA, Gromov AV, Titov NV. Assessment of annual effective dose from external exposure in forests of the south-western districts of the Bryansk region of Russia: 2015–2021. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(3): 58–71. (In Russian).
13. Travnikova IG, Bruk GY, Shutov VN, Bazyukin AB. Contribution of different foodstuffs to the internal exposure of the rural inhabitants of the Bryansk region in Russia after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2013;6(2): 11–20. (In Russian).
14. Falandysz J, Meloni D, Fernandes AR, Saniewski M. Effect of drying, blanching, pickling and maceration on the fate of ^{40}K , total K and ^{137}Cs in bolete mushrooms and dietary intake. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022;29: 742–754.
15. Panov AV, Marochkina EV, Ponomarenko VV. On the role of mushrooms in the internal dose formation to the population in the Chernobyl NPP accident affected areas. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(1): 63–70. (In Russian).
16. Ramzaev V, Yonehara H, Hille R, Barkovsky A, Mishine A, Sahoo SK, et al. Gamma-dose rates from terrestrial and Chernobyl radionuclides inside and outside settlements in the Bryansk Region, Russia in 1996–2003. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006;85: 205–227.
17. Ramzaev VP, Barkovsky AN. Method for identifying areas of virgin soils using a portable gamma-spectrometer-dosimeter. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(2): 123–128. (In Russian).
18. Ramzaev VP, Barkovsky AN. Dynamics of decrease of the gamma dose rate in air in rural settlements of the Bryansk region (Russia) in the remote period after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(1): 38–46. (In Russian).
19. Ramzaev V, Bernhardtsson C, Dvornik A, Barkovsky A, Vodovatov A, Jönsson M, et al. Calculation of the effective external dose rate to a person staying in the resettlement zone of the Vetka district of the Gomel region of Belarus based on *in situ* and *ex situ* assessments in 2016–2018. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020;214–215: 106168.
20. Fogh CL, Andersson KG. Dynamic behaviour of ^{137}Cs contamination in trees of the Bryansk region, Russia. *Science of the Total Environment*. 2001;269: 105–115.
21. Fesenko SV, Soukhova NV, Sanzharova NI, Avila R, Spiridonov SI, Klein D, et al. Identification of processes governing long-term accumulation of ^{137}Cs in forest trees following the Chernobyl accident. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2001;40: 105–113.
22. Kaduka MV, Shutov VN, Bruk GYA, Balonov MI. Role of soil and climate characteristics in the formation of radioactive contamination of mushrooms. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2008;1(1): 32–35. (In Russian).

Received: December 23, 2022

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

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

Kseniya V. Varfolomeeva – Junior Researcher of the Laboratory of Ecology, 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

Vladislav A. Nekrasov – Junior Researcher of the Laboratory of External Exposure, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

For citation: Ramzaev V.P., Barkovsky A.N., Varfolomeeva K.V., Nekrasov V.A. Radiological situation in the young pine forest that grew after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 1. P. 40–51. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-40-51

Оценка радиационного ущерба для здоровья: о возможности использования эффективной дозы для расчета числа потерянных лет здоровой жизни

Л.В. 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

Закон «О радиационной безопасности населения» Российской Федерации определяет эффективную дозу как «величину воздействия ионизирующего излучения, используемую как меру риска возникновения отдаленных последствий облучения организма человека...». В свою очередь, «Нормы радиационной безопасности» устанавливают процедуру оценки риска для здоровья, связанного с облучением в малых дозах, для 2 видов вредных последствий (онкологические заболевания и наследственные эффекты) и 2 половозрастных групп («Все население» и «Взрослые») путем умножения соответствующих линейных коэффициентов риска на эффективную дозу. В то же время указанные документы не исключают использование иных процедур оценки риска, не исключая использование каких-либо других показателей риска или выполнения оценки риска для иных половозрастных групп населения. Величина радиационного ущерба для здоровья, вычисляемая описанным в НРБ99/2009 способом для характеристики риска, в качестве единицы измерения использует 1 случай вызванного воздействием ионизирующего излучения средневзвешенного по числу потерянных лет жизни смертельного онкологического заболевания или приравненного к нему взвешенного по степени тяжести онкологического заболевания, не приводящего к смерти. В настоящее время величины, вычисляемые на основе показателей смертности, считаются недостаточно информативными характеристиками влияния внешних факторов на популяционное здоровье. Такие показатели слабо пригодны при сравнительном анализе рисков различной природы, особенно с учетом различного распределения последствий негативного воздействия во времени. В работе представлен прикладной подход, с помощью которого без внесения существенных изменений в сложившуюся практику радиационной защиты возможно расширить применение методологии оценки риска для здоровья. Рассматривается возможность использования в качестве показателя радиационного риска для здоровья величины DALY (числа потерянных вследствие облучения лет здоровой жизни, взвешенных с учетом нетрудоспособности); обсуждаются целесообразность изменения подходов к расчету эффективной дозы (путем использования различных значений взвешивающих коэффициентов для тканей и органов при расчете эффективной дозы применительно к различным половозрастным группам населения) и возможная сфера применения предлагаемых подходов к оценке риска на практике; предлагается подход к расчету значения DALY с помощью эффективной дозы и соответствующих коэффициентов риска ($DALY \times 36^{-1}$).

Ключевые слова: радиационный риск, радиационный ущерб, вред для здоровья, DALY, мера риска, популяционное здоровье, показатель риска.

Введение

Оценка рисков, как правило, прямо или косвенно связана с процессом принятия решений в условиях неполноты информации о возможных последствиях какого-либо действия (бездействия) или события. Оценка рисков для здоровья, сопряженных с произошедшим, происходящим или предполагаемым негативным воздействием вредного фактора на человека, связана, таким образом, с принятием решений о допустимости (приемлемости) указанного воздействия. Также на основании количес-

твенной и качественной оценки возможных последствий могут приниматься решения о принятии/непринятии мер реагирования или иных решений, регулирующих деятельность, связанную с воздействием вредного фактора или распространением последствий такого воздействия.

По объективным причинам система показателей популяционного здоровья изначально начала развиваться на основе регистрации причин смерти, поэтому одна утраченная вследствие каких-либо причин человеческая жизнь стала естественной мерой популяционного вреда. По мере

Репин Леонид Викторович

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

развития систем здравоохранения и медицинской статистики, систем сбора данных и классификации нарушений здоровья более надежной и информативной основой для характеристики популяционного здоровья стали показатели, рассчитываемые на основании регистрации не только случаев смерти, но и случаев заболеваний. На протяжении многих лет обобщенные показатели состояния популяционного здоровья основывались на оценке заболеваемости и смертности населения от различных причин. Однако уже в 1980-е гг. мировое научное сообщество пришло к пониманию, что показатели заболеваемости и смертности все же недостаточно информативны и не вполне соответствуют требованиям времени и решаемым задачам в области охраны здоровья людей. Так, П.В. Рамзаев в 1982 г. писал: «Предложение – выразить все богатство общества через величину здоровья, в виде, например, миллиардов человеко-лет полноценной жизни, как мы думаем, не такое уж бесперспективное, как может показаться на первый взгляд. Оно особенно привлекательно для сбалансированного подхода при разработке общегосударственных мер по здравоохранению. Вся пользу и весь вред (затраты) применительно к медицине надо учитывать в единицах величины здоровья, что, разумеется, не отменяет учета заболеваемости и других медицинских показателей».

Для планирования социально-экономического развития общества вряд ли кому-либо из ученых на сегодня удастся изыскать и предложить «экономический эквивалент» здоровью на 1 год полноценной жизни (чем и предлагается измерять здоровье как величину) больше, чем душевой национальный доход» [1].

Однако в те годы методология оценки числа «лет полноценной жизни» еще не была развита в достаточной степени для практической реализации подобных идей применительно к оценке воздействия вредных факторов среды обитания. Лишь десятилетие спустя в рамках развития проекта Всемирной организации здравоохранения «Глобальное бремя болезней» (ГББ) была разработана методология оценки вреда для здоровья на основе учета числа потерянных вследствие какой-то причины лет полноценной жизни. Были разработаны обобщенные показатели популяционного здоровья, учитывающие годы, утраченные вследствие преждевременной смерти, и годы, прожитые в состоянии «неполного здоровья» [2, 3].

К этому времени Международной комиссией по радиологической защите (МКРЗ) был разработан и внедрен в практику собственный показатель для количественной оценки негативного воздействия малых доз ионизирующего излучения на здоровье людей, базирующийся на сведениях об онкологической смертности вследствие облучения, – радиационный ущерб [4]. Данный показатель включал в себя смертельные случаи радиационно-индуцированных злокачественных новообразований (ЗНО) и приравненные к ним несмертельные ЗНО, взвешенные с учетом их тяжести. Методология оценки тяжести заболеваний основывалась на данных о летальности отдельных нозологических форм ЗНО.

К моменту выхода 103-й Публикации МКРЗ [5] методология расчета показателя ущерба несколько изменилась,

т.к. по мере накопления эпидемиологических данных стало возможным получать более надежные оценки радиационного риска на основе регистрации данных об онкологической заболеваемости, однако сама суть единицы радиационного ущерба¹ не изменилась. Таким образом, используемая в настоящее время величина радиационного ущерба, с одной стороны, несколько опередила свое время, позволяя учитывать при оценке риска как вероятность возникновения негативных последствий воздействия радиации на здоровье, так и степень тяжести таких последствий. С другой стороны, указанная методология не позволяет напрямую использовать результаты оценки риска при решении задач сравнительного анализа рисков различной природы. Одним из путей решения указанной проблемы является выбор более универсального и широко используемого показателя популяционного здоровья в качестве меры радиационного ущерба.

С точки зрения оценки решаемых задач, можно выделить 2 основных направления развития методологии оценки радиационного риска для здоровья:

- разработка и совершенствование моделей риска, нацеленных на прогнозирование ожидаемых негативных последствий облучения (теоретическое или фундаментальное направление);
- разработка методических подходов, нацеленных на обоснование гигиенических нормативов, дозовых критериев и иных величин, используемых в области радиационной защиты (прикладное направление).

Задачи, решаемые в рамках первого направления, нацелены на повышение точности прогнозных моделей развития стохастических эффектов облучения; на решение задачи межпопуляционного переноса оценок риска; на создание биологических моделей радиационного риска, т.е. моделей риска, описывающих механизмы возникновения с течением времени нарушений здоровья вследствие облучения (в частности, на разработку математических моделей радиационного канцерогенеза). Главным критерием качества получаемых моделей, таким образом, можно считать их предсказательную точность.

Для второго направления главными критериями оценки являются простота практического использования моделей, информационная емкость показателей и наглядность представления результатов расчета и характеристики риска, даже если они вступают в некоторое противоречие с математической строгостью расчетов. Такой подход типичен в условиях наличия существенных неопределенностей при оценке риска (например, при оценке радиационных рисков в области малых доз или при малых мощностях дозы).

Наибольшее распространение в области обеспечения радиационной безопасности получил подход к оценке радиационного риска в области малых доз или мощностей дозы на основе значения коллективной эффективной дозы с использованием линейных коэффициентов радиационного ущерба. Данный подход повсеместно используется на протяжении 30 лет, хотя и обладает известными недостатками, сужающими возможную сферу его приме-

¹ Здесь и далее под радиационным ущербом понимается радиационный ущерб для здоровья, если не сказано иное.

нения². К числу наиболее значимых особенностей названной методологии относятся следующие:

- значения коэффициентов ущерба рассчитаны МКРЗ только для 2 возрастных групп населения (все население и лица трудоспособного возраста);
- значения взвешивающих множителей для органов и тканей (W_T) определены на основании расчета значений относительного вреда для группы «Все население», хотя для ряда локализаций (например, легкого) значения относительного вреда существенно меняются с возрастом;
- оценка риска по такой методике осуществляется для искусственно сформированной популяции (номинальной популяции МКРЗ), не существующей в реальности;
- медико-демографические показатели, использованные для расчета радиационного ущерба, несколько устарели к настоящему времени.

Названные и некоторые другие особенности методологии оценки радиационного ущерба для здоровья заставляют достаточно осторожно относиться к результатам оценки риска и сфере их возможного использования, хотя на практике даже специалисты зачастую воспринимают полученные таким образом результаты оценки риска чуть ли не как прогнозные.

Цель исследования – изучение возможности применения эффективной дозы для оценки предполагаемого числа потерянных лет здоровой жизни в качестве меры риска от воздействия малых доз ионизирующих излучений на здоровье человека.

Задачи исследования

- изучена методология [5–13], использованная МКРЗ для оценки радиационного ущерба и вычисления значений взвешивающих коэффициентов для органов и тканей с учетом их радиочувствительности;
- изучена методология, используемая ВОЗ [14] при вычислении показателя DALY для оценки числа лет здоровой жизни, потерянных вследствие заболевания;
- методология ВОЗ применена для расчета числа лет здоровой жизни, теряемых вследствие воздействия ионизирующего излучения в малых дозах;
- методология МКРЗ применена для расчета значений взвешивающих коэффициентов органов и тканей с учетом их радиочувствительности на основе значений DALY на единицу дозы облучения;
- проведен сравнительный анализ полученных результатов с результатами расчетов МКРЗ и результатами расчетов, приводимыми в работах других авторов.

Материалы и методы

Для расчета показателей риска в настоящей работе были использованы медико-демографические показате-

ли 3 различных популяций: 1) азиатской популяции МКРЗ; 2) евро-американской популяции МКРЗ; 3) российской популяции. Источниками медико-демографических данных (т.е. сведений о половозрастном составе, а также возрастных показателях онкологической заболеваемости и возрастных показателях онкологической и общей смертности) популяций МКРЗ стали 103-я [5, 6] и 152-я [8] публикации МКРЗ. Номинальная популяция МКРЗ включает в себя обе вышеназванные популяции МКРЗ, а результаты оценки рисков для номинальной популяции получаются путем усреднения результатов расчета, полученных для каждой из указанных популяций в отдельности.

Сведения о половозрастном составе населения Российской Федерации были получены из базы данных Росстата за 2018 г. [16], а данные о заболеваемости и смертности в российской популяции – из сборника «Злокачественные новообразования в России в 2018 г.» [16].

Для расчета показателей радиационного ущерба МКРЗ применялась методика, описанная в 152-й публикации МКРЗ [8]. Показатели DALY рассчитывались с использованием методики, описанной в [17].

Для расчета показателей радиационного ущерба для здоровья российской популяции применялись данные об относительной выживаемости после возникновения онкологических заболеваний, приведенные в [18]. При этом в процессе анализа результатов также применялся метод оценки летальности, применимый к стационарным популяциям (к которым не может быть отнесена российская), представляющий собой частное от деления возрастных показателей онкологической смертности на соответствующие возрастные показатели выявляемости онкологических заболеваний (mortality incidence ratio).

Компьютерные программы, использованные для собственных расчетов, написаны с использованием систем Wolfram Mathematica и 1C: Предприятие 8.3 [19].

Результаты и обсуждение

Результаты расчетов по модели радиационного риска МКРЗ

Первым шагом в решении поставленных задач стала реализация модели радиационного риска МКРЗ в виде компьютерной программы на языке Wolfram Mathematica. Между выходом 103-й публикации МКРЗ [5, 6], в которой в общих чертах описана методология, использованная для расчета радиационного ущерба, и выходом 152-й публикации МКРЗ [8], в которой была детально описана указанная методология и представлены все использованные для расчетов медико-демографические данные, прошло 15 лет. К выходу 152-й публикации МКРЗ в методологию оценки риска были внесены некоторые изменения и исправлены некоторые ошибки 103-й публикации в части

² Важно отметить, что МКРЗ предлагает использовать эффективную дозу для решения задач в области планирования и оптимизации радиационной защиты, а также для контроля за соблюдением пределов доз. При этом величина коллективной эффективной дозы с точки зрения МКРЗ «является инструментом для оптимизации и для сравнения различных радиационных технологий и процедур защиты, преимущественно в контексте профессионального облучения» [6]. НКДАР ООН занимает еще более жесткую позицию по данному вопросу: «Коллективная доза должна использоваться только в сравнительных целях» и «Не рекомендуется агрегировать очень низкие дозы в течение продолжительных периодов времени для большого числа людей с целью оценки абсолютных показателей радиационно-индуцированных последствий для здоровья населения, подвергающегося возрастающим дозам на уровнях, сравнимых с нормальным уровнем природного фона или ниже» [7]. Однако на практике позиция МКРЗ и НКДАР ООН очень часто игнорируется.

описания методологии. Основные изменения коснулись оценки риска радиационно-индуцированных лейкозов и раков молочной железы. Кроме того, в обеих публикациях некоторые коэффициенты моделей и результаты расчетов представлялись с различной точностью, что несколько затрудняло отладку программы, однако в итоге удалось добиться очень высокой согласованности результатов. Степень согласованности результатов расчета, сделанного авторами, с результатами, представленными в 152-й публикации МКРЗ, можно оценить по данным, представленным в таблице 1. Для справки приводятся аналогичные результаты, представленные в 103-й публикации. Приведенные коэффициенты рассчитаны путем усреднения по полу и по 2 популяциям – евро-американской и азиатской.

Полученные результаты позволили уверенно использовать программу для дальнейших расчетов, обеспечивая очень высокий уровень сопоставимости оценок риска и корректность сравнительного анализа.

На следующем этапе работы с использованием разработанной программы были рассчитаны значе-

ния коэффициентов риска для группы «Все население» применительно к номинальной популяции, половозрастной состав и медико-демографические характеристики которой представлены в 103-й и 152-й публикациях МКРЗ, и к российской популяции, с использованием данных за 2018 г. [15, 16]. Результаты расчета представлены в таблице 2. Здесь, как и в таблице 1, результаты усреднены по полу³, а для справки приведены результаты расчетов МКРЗ, представленные в 103-й публикации.

Как видно из таблицы 2, расчеты авторов настоящей работы для номинальной популяции согласуются с данными 103-й публикации МКРЗ с суммарной погрешностью не более 2–3% (и погрешностью для отдельных органов не более 10%)⁴.

Именно коэффициенты риска возникновения ЗНО, рассчитанные для номинальной популяции МКРЗ, лежат в основе вычисления радиационного ущерба, относительного вреда, коэффициентов риска и значений взвешивающих множителей W_T для органов и тканей с учетом их радиочувствительности.

Таблица 1

Коэффициенты номинального риска для лиц трудоспособного возраста

[Table 1]

Nominal risk coefficients for the working age population]

Орган/ткань* [Organ/tissue]**	Коэффициенты номинального риска (случаев на 10 000 человек на 1 Гр) [Nominal risk coefficients (cases per 10,000 persons per Gy)]		
	Собственные расчеты [Own calculations]	152-я публикация МКРЗ [ICRP 152 Publication]	103-я публикация МКРЗ [ICRP 103 Publication]
Пищевод [Oesophagus]	13	13	16
Желудок [Stomach]	63	64	60
Толстая кишка [Colon]	55	55	50
Печень [Liver]	25	25	21
Легкое [Lung]	115	117	127
Молочная железа [Female breast]	65	66	49
Яичник [Ovary]	9	9	7
Мочевой пузырь [Urinary bladder]	37	38	42
Щитовидная железа [Thyroid]	10	10	9
Костный мозг [Bone marrow]	45	44	23
Другие солидные [Other solid]	98	98	88
Всего [Total]:	535	539	492

* Названия органов и тканей приводятся в соответствии с русским переводом 103-й публикации МКРЗ [6] [*the names of organs and tissues are given accordingly the ICRP 103 Publication in Russian translation];

** В таблицу 1 не включены наследственные эффекты, раки поверхности кости и раки кожи, т.к. для них в указанных публикациях МКРЗ не представлены модели и не производились отдельные вычисления [**the table does not include hereditary effects, bone surface cancers, and skin cancers, because specified ICRP publications don't contain any models for these organs/tissues].

³ В зависимости от целей расчета вклад мужского и женского населения в общую численность можно также учитывать исходя из реальных демографических данных, однако для целей настоящей работы усреднение по полу производилось в соотношении по 50% мужского и женского населения.

⁴ Указанные различия (прежде всего, по раку легкого) объясняются изменениями, внесенными в методологию МКРЗ в рамках 152-й публикации [8]. К сожалению, результаты оценки представлены в указанной публикации недостаточно подробно, что не позволило сравнивать результаты нашего расчета напрямую, однако для решения задач настоящего исследования полученная точность оценки более чем достаточна.

Коэффициенты радиационного риска возникновения злокачественных новообразований для всего населения

Таблица 2

[Table 2]

Nominal risk coefficients for the whole population]

Орган/ткань* [Organ/tissue]	Коэффициенты номинального риска (случаев на 10 000 человек на 1 Гр) [Nominal risk coefficients (cases per 10,000 persons per Gy)]		
	Собственный расчет по данным РФ [Own calculations using Russian population data]	Собственный расчет по данным 152-й публикации МКРЗ [Own calculations using ICRP 152 Publication's data]	Данные 103-й публикации МКРЗ [ICRP 103 Publication's data]
Пищевод [Oesophagus]	9	14	15
Желудок [Stomach]	50	79	79
Толстая кишка [Colon]	41	66	65
Печень [Liver]	15	31	30
Легкое [Lung]	68	104	114
Молочная железа [Female breast]	79	111	112
Яичник [Ovary]	9	11	11
Мочевой пузырь [Urinary bladder]	24	40	43
Щитовидная железа [Thyroid]	43	32	33
Костный мозг [Bone marrow]	39	142	144
Другие солидные [Other solid]	76	43	42
Всего [Total]:	453	673	688

* См. примечание к таблице 1 [see note to Table 1]

Расчет взвешивающих множителей для органов и тканей

Один из центральных вопросов настоящего исследования заключался в том, насколько чувствительны значения взвешивающих коэффициентов органов и тканей к выбираемым для их расчета половозрастным группам. Значения коэффициентов W_T , приведенные в 103-й публикации МКРЗ, были получены путем группировки значений относительного вреда, рассчитанных для группы «Все население», с выполнением 2 основных условий:

- усреднение значений по полу и возрасту при облучении;
- отличие коэффициентов относительного вреда для органов, которым приписывалось одинаковое значение коэффициента W_T , не более чем в 2 раза.

Выбор именно группы «Все население» для установления значений W_T представляется не бесспорным, поскольку, хотя численность указанной когорты существенно превосходит численность персонала радиационных объектов, состоящего на индивидуальном дозиметрическом контроле, тем не менее, предел дозы, установленный для персонала, существенно выше, чем для населения, что в некотором смысле делает указанную группу населения подверженной более высокому среднему индивидуальному риску, а значит, точность оценки для этой группы имеет достаточно важное гигиеническое значение. В таблице 3 представлены значения коэффициентов W_T и значения показателей относительного вреда для 4 половозрастных групп населения по данным 103-й пу-

Таблица 3

Значения относительного вреда и взвешивающих коэффициентов органов и тканей (W_T)

[Table 3]

Relative detriment and tissue weighting factors (W_T)

Орган/ткань [Organ/tissue]	Номинальная популяция МКРЗ [ICRP's nominal population]				W_T
	Все население [Whole population]	Лица трудоспособного возраста [Working age population]	Мужчины [Males]	Женщины [Females]	
Пищевод [Oesophagus]	0,023	0,034	0,026	0,020	0,04
Желудок [Stomach]	0,118	0,123	0,120	0,117	0,12
Толстая кишка [Colon]	0,083	0,102	0,138	0,044	0,12
Печень [Liver]	0,046	0,047	0,075	0,026	0,04
Легкое [Lung]	0,157	0,286	0,124	0,182	0,12
Кость [Bone surface]	0,009	0,008	0,011	0,008	0,01

Орган/ткань [Organ/tissue]	Номинальная популяция МКРЗ [ICRP's nominal population]				W_T
	Все население [Whole population]	Лица трудоспособного возраста [Working age population]	Мужчины [Males]	Женщины [Females]	
Кожа [Non-melanoma skin cancer]	0,007	0,006	0,008	0,006	0,01
Молочная железа [Female breast]	0,139	0,077	–	0,240*	0,12
Яичник [Ovary]	0,017	0,016	–	0,030	–**
Мочевой пузырь [Urinary bladder]	0,029	0,046	0,036	0,024	0,04
Щитовидная железа [Thyroid]	0,022	0,008	0,010	0,031	0,04
Костный мозг [Bone marrow]	0,107	0,057	0,144	0,080	0,12
Другие солидные [Other solid]	0,198	0,155	0,256	0,155	0,12
Гонады (наследственные заболевания) [Gonads (Heritable)]	0,044	0,036	0,053	0,038	0,08
Головной мозг [Brain]	–	–	–	–	0,01**
Слюнные железы [Salivary glands]	–	–	–	–	0,01**
				Сумма [Total]:	1,00

* Значение в таблице превышает значение W_T ровно в 2 раза только благодаря округлению. Без округления различие более чем двукратно [the value in this table is exactly twice the W_T value only due to rounding. Without rounding, the difference is more than twice];

** В 103-й публикации МКРЗ не приведены значения относительного вреда для головного мозга и слюнных желез, но приведены значения W_T . Для яичников, напротив, приведены значения относительного вреда, но не приведено значение W_T . Однако сумма значений W_T указанных органов составляет всего 2% от общей суммы, и это не оказывает никакого влияния на дальнейшие рассуждения и выводы [the ICRP Publication 103 does not contain relative harm values for the brain and the salivary glands, but contains W_T values. For ovary, on the contrary, relative harm values is given, but W_T value is not given. However, the sum of the W_T values of these organs is only 2% of the total sum, and this does not have any effect on further reasoning and conclusions].

бликации МКРЗ: все население, лица трудоспособного возраста, все мужчины и все женщины. Жирным шрифтом выделены значения показателей относительного вреда, отличающиеся от коэффициентов W_T более чем вдвое. Между собой внутри одной группы значения относительного вреда отличаются еще больше.

Как видно из таблицы 3, для 3 половозрастных групп условие о не более чем двукратном отличии значений относительного вреда от коэффициентов W_T нарушается суммарно в 9 случаях. Отличия же значений относительного вреда между собой внутри групп с одинаковым W_T еще больше (в группе «Трудоспособный возраст» значения относительного вреда для рака легкого и для костного мозга отличаются более чем в 5 раз, хотя им приписывается одинаковое значение $W_T = 0,12$).

Первый вопрос, вставший перед авторами исследования после анализа данных, представленных в таблице 3, заключался в том, можно ли подобрать значения коэффициентов W_T , которые лучше удовлетворяют данным для всех 4 когорт без существенного изменения подхода и без повышения числа значащих цифр коэффициентов W_T . Положительный ответ на данный вопрос означал бы, что возможно некоторое повышение математической строгости расчета эффективной дозы с тем, чтобы она лучше отвечала своей главной роли как меры риска от воздействия малых доз при неравномерном по телу облучении.

Для решения данной задачи был разработан алгоритм и написана программа [20] в системе Wolfram Mathematica [21], в результате выполнения которой были получены альтернативные значения коэффициентов W_T , представленные в таблице 4.

Анализ полученных результатов показал, что при использовании альтернативных значений W_T лишь 5 значений относительного вреда не будут удовлетворять поставленному условию, при этом в 3 случаях различие будет меньше, чем в таблице 3, а в 1 из 2 оставшихся различия значений можно увидеть, только увеличив число значащих цифр. Таким образом, полученные значения W_T значительно точнее удовлетворяют сформулированным условиям.

Тем не менее, была проведена еще одна проверка рассчитанных значений W_T , чтобы получить ответ на следующий вопрос: какова сумма модулей разности между показателем относительного вреда и соответствующим взвешивающим множителем для всех 4 половозрастных групп и для суммы органов в целом. Результаты этой проверки представлены в таблице 5.

В таблице 5, как и прежде, жирным шрифтом выделены худшие значения в каждой паре. Как видно, альтернативные значения W_T существенно ближе к значениям относительного вреда для каждой половозрастной группы как по сумме, так и по количеству органов. Лишь 2–3 значения (в основном, для ЗНО желудка, мочевого пузыря и

Таблица 4

Альтернативные значения взвешивающих коэффициентов для органов и тканей W_T , рассчитанные в рамках настоящего исследования

[Table 4]

Alternative tissue weighting factors values W_T , obtained in this study

Орган/ткань [Organ/tissue]	W_T	W_T	Значения относительного вреда для номинальной популяции МКРЗ [Relative detriment values for ICRP's nominal population]			
			Все население [Whole population]	Лица трудоспособного возраста [Working age population]	Мужчины [Males]	Женщины [Females]
Пищевод [Oesophagus]	0,04	0,02	0,023	0,034	0,026	0,020
Желудок [Stomach]	0,12	0,11	0,118	0,123	0,120	0,117
Толстая кишка [Colon]	0,12	0,11	0,083	0,102	0,138	0,044
Печень [Liver]	0,04	0,04	0,046	0,047	0,075	0,026
Легкое [Lung]	0,12	0,19	0,157	0,286	0,124	0,182
Кость [Bone surface]	0,01	0,01	0,009	0,008	0,011	0,008
Кожа [Non-melanoma skin cancer]	0,01	0,01	0,007	0,006	0,008	0,006
Молочная железа [Female breast]	0,12	0,11	0,139	0,077	–	0,240
Яичник [Ovary]	–*	0,02	0,017	0,016	–	0,030
Мочевой пузырь [Urinary bladder]	0,04	0,02	0,029	0,046	0,036	0,024
Щитовидная железа [Thyroid]	0,04	0,02	0,022	0,008	0,010	0,031
Костный мозг [Bone marrow]	0,12	0,11	0,107	0,057	0,144	0,080
Другие солидные [Other solid]	0,12	0,19	0,198	0,155	0,256	0,155
Гонады (наследственные заболевания) [Gonads (Heritable)]	0,08	0,04	0,044	0,036	0,053	0,038
Головной мозг [Brain]	0,01*	–	–	–	–	–
Слюнные железы [Salivary glands]	0,01*	–	–	–	–	–
Сумма [Total]:	1,00	1,00				

* См. Примечание ** к таблице 3 [see the note ** to Table 3].

Таблица 5

Сравнительная оценка отклонения значений относительного вреда от взвешивающих множителей органов и тканей, вычисленных по данным 103-й публикации МКРЗ и полученных в ходе выполнения данной работы*

[Table 5]

Comparative assessment of the deviation of relative harm values from the tissue weighting factors calculated according to the ICRP's 103rd publication and those obtained in this study*

Орган/ткань [Organ/tissue]	Все когорты [All age groups]		Все население [Whole population]		Трудоспособные [Working age population]		Мужчины [All males]		Женщины [All females]	
	МКРЗ [ICRP]		МКРЗ [ICRP]		МКРЗ [ICRP]		МКРЗ [ICRP]		МКРЗ [ICRP]	
	МКРЗ [ICRP]	Собственный расчет [Own calculations]	МКРЗ [ICRP]	Собственный расчет [Own calculations]	МКРЗ [ICRP]	Собственный расчет [Own calculations]	МКРЗ [ICRP]	Собственный расчет [Own calculations]	МКРЗ [ICRP]	Собственный расчет [Own calculations]
Пищевод [Oesophagus]	0,057	0,023	0,017	0,003	0,006	0,014	0,014	0,006	0,020	0,000
Желудок [Stomach]	0,009	0,037	0,002	0,008	0,003	0,013	0,000	0,010	0,003	0,007
Толстая кишка [Colon]	0,149	0,129	0,037	0,027	0,018	0,008	0,018	0,028	0,076	0,066
Печень [Liver]	0,062	0,062	0,006	0,006	0,007	0,007	0,035	0,035	0,014	0,014
Легкое [Lung]	0,269	0,203	0,037	0,033	0,166	0,096	0,004	0,066	0,062	0,008
Кость [Bone surface]	0,006	0,006	0,001	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001	0,002	0,002

Орган/ткань [Organ/tissue]	Все когорты [All age groups]		Все население [Whole population]		Трудоспособные [Working age population]		Мужчины [All males]		Женщины [All females]	
	МКРЗ [ICRP]	Собственный расчет [Own calculations]	МКРЗ [ICRP]	Собственный расчет [Own calculations]	МКРЗ [ICRP]	Собственный расчет [Own calculations]	МКРЗ [ICRP]	Собственный расчет [Own calculations]	МКРЗ [ICRP]	Собственный расчет [Own calculations]
Кожа [Non-melanoma skin cancer]	0,012	0,012	0,003	0,003	0,004	0,004	0,002	0,002	0,004	0,004
Молочная железа [Female breast]	0,302	0,302	0,019	0,029	0,043	0,033	0,120	0,110	0,120	0,130
Мочевой пузырь [Urinary bladder]	0,037	0,055	0,011	0,009	0,006	0,026	0,004	0,016	0,016	0,004
Щитовидная железа [Thyroid]	0,089	0,035	0,018	0,002	0,032	0,012	0,030	0,010	0,009	0,011
Костный мозг [Bone marrow]	0,140	0,120	0,013	0,003	0,063	0,053	0,024	0,034	0,040	0,030
Другие солидные [Other solid]	0,284	0,144	0,078	0,008	0,035	0,035	0,136	0,066	0,035	0,035
Гонады (наследственные заболевания) [Gonads (Heritable)]	0,149	0,022	0,036	0,004	0,044	0,004	0,027	0,013	0,042	0,002
Сумма [Total]:	1,565	1,151	0,278	0,135	0,428	0,305	0,415	0,396	0,444	0,314

* Значения для яичников, головного мозга и слюнных желез в таблице не приводятся, т.к. не могут быть вычислены. См. примечание ** к таблице 3 [values for the ovary, brain and salivary glands are not given in the table, because they can't be calculated. See note ** to Table. 3].

молочной железы), полученных в результате нашего расчета, против 6–7 у МКРЗ в каждой половозрастной группе отличаются в худшую сторону (исключение составляет группа «Все мужчины», для которой результаты расчетов с использованием альтернативных тканевых множителей лишь немногим лучше, чем при использовании тканевых множителей, рекомендованных МКРЗ). При этом для группы «Все население» суммарная разница значений более чем двукратна.

Представленный подход к расчету значений взвешивающих коэффициентов органов и тканей с учетом их радиочувствительности показал, что даже незначительные изменения в расчете эффективной дозы позволяют достичь примерно в полтора раза более математически строгого результата при ее использовании в качестве меры риска при неравномерном облучении в различных половозрастных группах населения. Полученные результаты представляют определенный теоретический интерес и были призваны коротко продемонстрировать потенциал для возможных усовершенствований используемой методологии оценки радиационного ущерба, дабы заложить прочное основание дальнейших исследований.

Величина радиационного ущерба МКРЗ

Коллективная эффективная доза облучения, как было сказано выше, используется в качестве меры коллектив-

ного радиационного риска с учетом различий в видах и геометриях облучения, а также в радиочувствительности органов, тканей и систем организма. Показателем же риска, значение которого рассчитывается на основании эффективной дозы, является величина радиационного ущерба. Единица измерения радиационного ущерба рассчитывается на основе оценки пожизненной вероятности возникновения радиационно-индуцированного онкологического заболевания (или наследственного эффекта) на единицу дозы облучения и представляет собой 1 случай взвешенного по среднему сокращению продолжительности жизни смертельного онкологического заболевания или приравненного к нему несмертельного заболевания, взвешенного с учетом его тяжести.

Радиационный ущерб для конкретного органа/ткани рассчитывается по формуле [8]:

$$D=R(k+q(1-k))I, \quad (1)$$

где D – радиационный ущерб для здоровья;

R – коэффициент номинального риска (возникновения ЗНО);

I – множитель, выражающий отношение среднего числа лет здоровой жизни, потерянных вследствие возникновения рака конкретной локализации (при облучении конкретного органа/ткани), к среднему числу лет здоровой жизни, потерянных вследствие всех ЗНО;

k – доля летальности конкретного ЗНО;

q – множитель, отражающий степень тяжести онкологического заболевания.

По сути в формуле (1) при внесении R в скобки произведение $R \times k$ выражает риск возникновения смертельного ЗНО, а $R \times (1-k) \times q$ – риск нелетального рака, умноженный на коэффициент q (меньше 1), отражающий степень тяжести нелетального заболевания. Полученное таким образом выражение представляет собой радиационный вред для конкретного заболевания, а при умножении на I получается значение относительного вреда конкретного ЗНО, т.е. с его помощью происходит взвешивание между собой различных ЗНО по числу потерянных лет жизни.

Наиболее дискуссионным здесь представляется подход к вычислению множителя q , отражающего степень тяжести заболевания. Он вычисляется по следующей формуле:

$$q = k + q_{\min} (1 - k), \quad (2)$$

где k – доля летальности ЗНО;

а $q_{\min}$ – определенный экспертно минимальный вес для несмертельных ЗНО (для большинства ЗНО его значение принято равным 0,1, для рака кожи – 0, для рака щитовидной железы – 0,2).

Как видно из формулы (2), единственная характеристика ЗНО, учитываемая при определении степени тяжести заболевания, – это доля его летальности. Это не вполне согласуется с позицией МКРЗ, выраженной следующим образом: «(А 144) Вред по снижению качества жизни. Больные раком обычно ощущают ухудшение качества своей жизни. Таким образом, Комиссия считает, что рак должен оцениваться не только по летальности, но и по боли, страданиям и любым побочным эффектам лечения рака» [6]. Именно для решения этой задачи и вводится коэффициент $q_{\min}$, но, как видно, определяется он довольно субъективно. А главное, подобный подход к оценке тяжести заболеваний не используется при характеристике рисков иной природы. При этом более объективный показатель (множитель I в формуле (1)) используется при взвешивании показателей вреда и тоже косвенно участвует в определении степени популяционного урона, связанного с риском возникновения конкретного заболевания, вызванного воздействием ионизирующего излучения.

Оценка числа потерянных лет здоровой жизни

Причина описанного выше подхода к оценке вклада несмертельных заболеваний в суммарный радиационный ущерб заключается в том, что концепция оценки тяжести заболеваний на основе показателей летальности была разработана к моменту выхода 60-й публикации МКРЗ, т.е. за несколько лет до разработки более универсальной методологии оценки тяжести различных нарушений здоровья в рамках проекта ГББ. Продолжение же использования данной концепции после выхода 103-й публикации МКРЗ [5, 6] объясняется некоторой инертностью международной системы радиационной защиты. Однако возможность изменения действующих подходов уже рассматривается в рамках 152-й публикации МКРЗ [8] и в публикациях 102-й рабочей

группы МКРЗ [9–11]. Пророческими в этом смысле стали слова П.В. Рамзаева: «В реализации этого самого высокого закона жизни – взвешивания пользы и вреда, в отличие от Фемиды, врачи должны с открытыми глазами видеть обе чаши весов, на которые кладется величина здоровья народа. Самой надежной единицей ее измерения, отражающей все разнообразие болезней, оказался год (время) полноценной жизни. В ней учитывается и работоспособность, и самочувствие, и воспроизводство потомства. Эта величина и будет использоваться далее в расшифровке риска, вреда и пользы радиации, сопоставления ее с другими факторами риска, которыми, к несчастью, весьма «богата» жизнь человека» [22].

Реализация данной идеи стала возможной благодаря развитию в рамках проекта ГББ системы показателей популяционного здоровья [2, 3]. В настоящей работе в качестве меры радиационного риска был выбран показатель DALY⁵, т.е. показатель, отражающий число потерянных лет здоровой жизни. В зависимости от целей оценки риска похожим образом возможно применение и других обобщенных показателей популяционного здоровья.

Показатель DALY в наиболее общем виде можно представить в виде суммы двух слагаемых:

$$DALY = YLL + YLD, \quad (3)$$

где YLL – число лет, потерянных вследствие преждевременной смерти;

YLD – число лет, прожитых в состоянии «неполного здоровья», взвешенных по степени тяжести заболевания.

В рамках настоящей статьи мы не будем подробно останавливаться на описании методических подходов к оценке тяжести заболеваний. Важно лишь то, что данные подходы широко используются при оценке популяционного здоровья с использованием показателя DALY как в России, так и за рубежом, и применение данного показателя постоянно растет [23–26].

Как видно из такого определения, показатель DALY может использоваться для оценки негативного вклада в состояние популяционного здоровья различных заболеваний или причин смерти, в том числе и вызванных воздействием вредных факторов. Нами были рассчитаны значения DALY на единицу дозы облучения различных органов, тканей и систем организма с использованием медико-демографических показателей российской популяции для нескольких половозрастных групп населения. Результаты расчетов представлены в таблице 6.

Как видно из таблицы 6, усредненные по полу значения коэффициентов риска $DALY \times Gr^{-1}$ приблизительно равны 0,5 года⁶ для группы «Все население»; 0,9 года для группы «Дети и подростки» и 0,45 года для группы «Лица трудоспособного возраста».

Полученные значения DALY существенно меньше значений, получаемых для номинальных популяций МКРЗ, что хорошо согласуется с результатами сравнительной оценки риска для российской и номинальной популяций, выполненной в рамках [12]. Анализ причин упомянутых отличий показал, что основной вклад в уменьшение риска вносит

⁵ Disability-adjusted life years (англ. – годы жизни, взвешенные по нетрудоспособности).

⁶ Здесь и далее важно помнить, что единицей измерения DALY является потерянный год здоровой жизни, взвешенный с учетом утраты трудоспособности [Here and below, it is important to remember that the unit of measure for DALY is the year of healthy life lost, weighted by disability].

Таблица 6

Значения показателя DALY на 1 Гр поглощенной дозы в органе или ткани, вычисленные для российской популяции, лет
[Table 6]

Орган/ткань [Organ/ tissue]	Половозрастная группа населения [Age group of population]					
	Все население [Whole population]		Дети и подростки (0–17 лет) [Children]		Лица трудоспособного возраста (18–64 лет) [Working age population]	
	Мужчины	Женщины	Мужчины	Женщины	Мужчины	Женщины
Пищевод [Oesophagus]	0,012	0,010	0,016	0,009	0,011	0,012
Желудок [Stomach]	0,055	0,085	0,119	0,21	0,041	0,068
Толстая кишка [Colon]	0,045	0,025	0,09	0,056	0,036	0,021
Печень [Liver]	0,042	0,020	0,094	0,049	0,03	0,016
Легкое [Lung]	0,059	0,094	0,06	0,109	0,064	0,105
Молочная железа у женщин [Female breast]	–	0,101	–	0,325	–	0,061
Яичник [Ovary]	–	0,018	–	0,042	–	0,016
Мочевой пузырь [Bladder]	0,012	0,009	0,02	0,016	0,011	0,009
Щитовидная железа [Thyroid]	0,003	0,014	0,011	0,056	0,001	0,005
Другие солидные ЗНО [Other solid]	0,030	0,036	0,073	0,098	0,02	0,026
Красный костный мозг [Bone marrow]	0,124	0,113	0,149	0,131	0,127	0,124
Поверхность кости [Bone]*	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Головной мозг* [Brain]	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Слюнные железы* [Salivary glands]	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Кожа [Skin]*, **	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Наследственные заболевания [Gonads]*	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032
Всего [Total]	0,43	0,56	0,68	1,11	0,39	0,50

* Для указанных локализаций использованы оценки числа потерянных лет жизни из 103-й публикации МКРЗ для группы «Все население», что не оказывает значимого влияния на конечный результат и выводы [* for these localizations, estimates of the number of years of life lost from the ICRP Publication 103 for the “whole population” group were used. It doesn’t significantly affect the final result and conclusions];

** За исключением меланомы [** excepting melanoma skin cancers].

меньшая ожидаемая продолжительность жизни в российской популяции, особенно среди мужчин (рис.). Т.е. возникающие в российской популяции радиационно-индуцированные ЗНО реже успевают становиться причиной смерти.

Последний вопрос, ответ на который мы попытались получить в рамках настоящей работы, заключался в том, насколько сильно значения «относительного вреда» (т.е. доля вклада вреда для отдельных органов или тканей в общий вред), рассчитанные на основе DALY, отличаются от значений взвешивающих коэффициентов W_T , рекомендованных МКРЗ. Т.е. нас интересовал ответ на вопрос, можно ли использовать рассчитанные ранее значения коллективной эффективной дозы для грубой оценки числа потерянных лет здоровой жизни в российской популя-

ции в результате воздействия ионизирующих излучений. Результаты оценки представлены в таблице 7.

Как видно из таблицы 7, ни для одного органа или ткани не нарушается требование о не более чем двукратном отличии относительного вреда от значения соответствующего коэффициента W_T . Это свидетельствует о том, что коллективная эффективная доза может использоваться для грубой оценки числа потерянных вследствие облучения лет здоровой жизни.

Представленные в настоящей статье результаты показывают, что развитие методологии оценки радиационного ущерба с использованием современных обобщенных показателей популяционного здоровья открывает широкие возможности для более полной оценки рисков для здоровья, связанных с воздействием ионизирующих излучений.

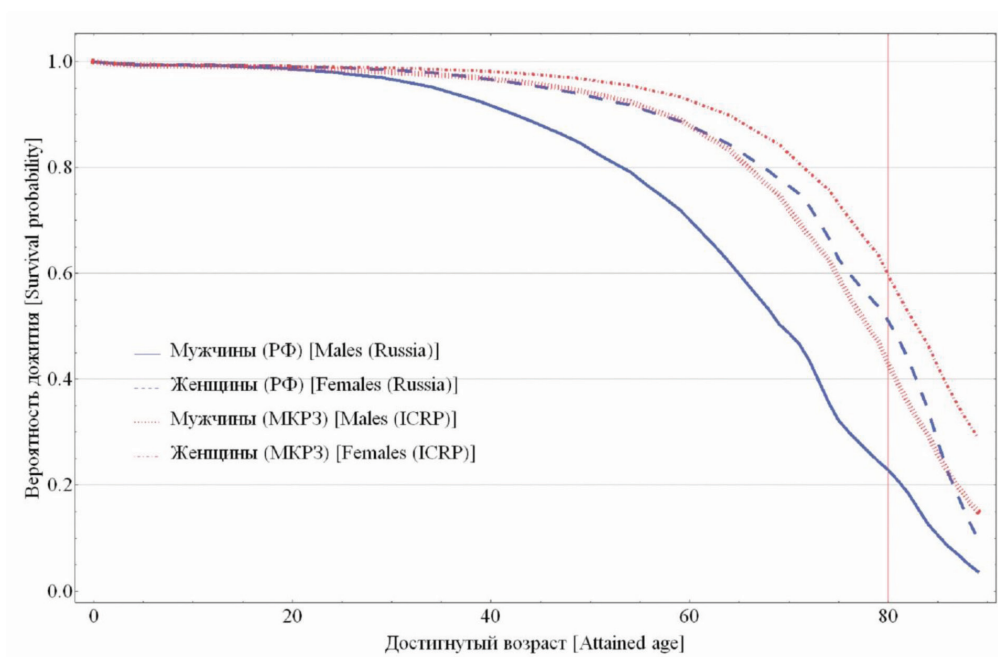


Рис. Вероятность дожития от рождения до заданного возраста в различных популяциях
[Fig.] Probability of surviving from birth to a given age in different populations

Таблица 7

Значения взвешивающих коэффициентов (W_T) для органов и тканей, используемые для расчета эффективной дозы, и значения относительной радиочувствительности, рассчитанные с помощью показателя DALY на единицу дозы облучения для группы «Все население», вычисленные для российской популяции, отн. ед.

[Table 7]

ICRP's tissue's weighting factors (W_T) and relative radiosensitivity values, calculated as a part of total DALY for the group "whole population" using Russian population data, rel. unit]

Локализация [Tissue]	W_T	Относительная радиочувствительность органа или ткани в суммарной оценке DALY [Relative DALY for tissue]
Пищевод [Oesophagus]	0,04	0,02
Желудок [Stomach]	0,12	0,14
Толстая кишка [Colon]	0,12	0,07
Печень [Liver]	0,04	0,06
Легкое [Lung]	0,12	0,16
Молочная железа [Female breast]	0,12	0,10
Мочевой пузырь [Urinary bladder]	0,04	0,02
Щитовидная железа [Thyroid]	0,04	0,02
Другие солидные ЗНО [Other solid malignant neoplasms]	0,12	0,07
Красный костный мозг [Leukaemias]	0,12	0,24
Поверхность кости [Bone]	0,01	0,01
Головной мозг и ЦНС [Brain]	0,01	0,01
Слюнные железы [Salivary glands]	0,01	0,01
Рак кожи, за исключением меланомы [Non-melanoma skin cancer]	0,01	0,01
Наследственные заболевания [Hereditary diseases]	0,08	0,06

Выводы

1. Величина DALY может использоваться в качестве меры риска для здоровья человека, связанного с воздействием ионизирующих излучений.

2. Радиационный ущерб для здоровья можно оценивать с помощью показателя DALY. Данный показатель об-

ладает существенно большей универсальностью при решении задач сравнительного анализа рисков различной природы, чем используемый в настоящее время показатель радиационного ущерба МКРЗ.

3. Эффективная доза может использоваться для грубой предварительной оценки числа потерянных вслед-

ствие облучения лет здоровой жизни в качестве меры радиационного риска для здоровья в различных половозрастных группах населения Российской Федерации.

4. Число потерянных лет здоровой жизни на 1 чел.-Зв коллективной эффективной дозы (при облучении в малых дозах и/или с малой мощностью дозы) для группы «Все население» по российским медико-демографическим данным оценивается приблизительно в 0,5 года.

5. Пожизненные риски возникновения онкологических заболеваний на единицу дозы облучения в Российской Федерации примерно в полтора раза ниже, чем оцененные аналогичным образом риски в номинальной популяции МКРЗ.

6. Указанные различия еще больше (примерно в 1,75 раза) при оценке радиационного риска с помощью величины DALY.

7. Методология расчета зависимости DALY от дозы облучения для российской популяции нуждается в дальнейшем усовершенствовании.

8. Методика расчета эффективной дозы может быть скорректирована с учетом ее изначального назначения для использования в качестве меры риска при неравномерном облучении органов, тканей и систем организма.

Информация о конфликте интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов при выполнении работы и подготовке данной статьи.

Сведения об источнике финансирования

Статья подготовлена в рамках выполнения отраслевой НИР «Разработка и научное обоснование прикладных методов оценки радиационных рисков для здоровья населения при различных ситуациях и сценариях облучения на основе современных подходов к оценке радиационного ущерба».

Литература

1. Рамзаев П.В., Либберман А.Н. Принцип взвешивания «польза-вред» и его применение в радиационной гигиене // Сб. трудов «Радиационная гигиена». – Л.: ЛНИИРГ, 1982. С. 22–29.
2. Репин Л.В., Ахматдинов Р.Р., Библин А.М., Репин В.С. О гармонизации показателей радиационного риска для здоровья и риска от воздействия иных вредных факторов на основе оценки числа потерянных лет здоровой жизни // Анализ риска здоровью. 2022. № 1. С. 170–183. DOI 10.21668/health.risk/2022.1.18.
3. Repin L.V., Akhmatdinov R.R., Biblin A.M., Repin V.S. On harmonization of health risk indicators caused by ionizing radiation exposure and other harmful factors based on DALY estimates // Health Risk Analysis. 2022. No 1. P. 162–175. DOI 10.21668/health.risk/2022.1.18.eng.
4. Публикация 60 МКРЗ, часть 1, 61 МКРЗ. Рекомендации Международной комиссии по радиологической защите 1990 года. Пределы годового поступления радионуклидов в организм работающих, основанные на рекомендациях 1990 года. Пер. с англ. Т.Д. Кузьминой; под ред. И.Б. Кеирим-Маркуса. М.: Энергоатомиздат, 1994. 192 с.
5. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 // Annals of the ICRP. 2007. Vol. 37, No 2-4. 332 p.
6. Публикация 103 МКРЗ. Рекомендации 2007 года Международной комиссии по радиационной защите. Пер. с англ. И.А. Гусева; под общ. ред. М.Ф. Киселева, Н.К. Шандалы. М.: ООО ПКФ «Алана», 2009. 344 с.
7. United Nations. Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, effects and risks of ionizing radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic

- Radiation: UNSCEAR 2016 report to the General Assembly with scientific annexes. New York, N.Y.: United Nations, 2017.
8. Radiation detriment calculation methodology. ICRP Publication 152 // Annals of the ICRP. 2022. Vol. 51, No 3. 103 p.
9. Ban N., Cléro E., Vaillant L., et al. Radiation detriment calculation methodology: summary of ICRP Publication 152 // Journal of Radiological Protection. 2022. Vol. 42, № 2. DOI: 10.1088/1361-6498/ac670d.
10. Cléro E., Vaillant L., Hamada N., et al. History of radiation detriment and its calculation methodology used in ICRP Publication 103 // Journal of Radiological Protection. 2019. Vol. 39, № 3. P. R19–R36. DOI: 10.1088/1361-6498/ab294a.
11. Zhang W., Laurier D., Cléro E., et al. Sensitivity analysis of parameters and methodological choices used in calculation of radiation detriment for solid cancer // International Journal of Radiation Biology. 2021. Vol. 96, № 5. P. 596–605. DOI: 10.1080/09553002.2020.1708499.
12. Горский А.И., Чекин С.Ю., Максютов М.А., и др. Эффект переноса моделей радиационного риска МКРЗ на популяцию РФ // Радиация и риск. 2019. Т. 28, № 4. С. 5–15. DOI: 10.21870/0131-3878-2019-28-4-5-15.
13. Иванов В.К., Чекин С.Ю., Кашеев В.В., и др. Исследование влияния неопределённости фоновых показателей заболеваемости на прогноз радиационных рисков по моделям МКРЗ для российских популяций при однократном облучении // Радиация и риск. 2013. Т. 22, № 3. С. 40–56.
14. Mathers C.D. History of global burden of disease assessment at the World Health Organization // Archives of Public Health. 2020, Vol. 78. DOI: 10.1186/s13690-020-00458-3.
15. Витрина статистических данных. URL: <https://showdata.gks.ru/finder/> (Дата обращения: 10.11.2022).
16. Злокачественные новообразования в России в 2018 году (заболеваемость и смертность). Под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой М.: МНИОИ им. П.А. Герцена филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2019. 250 с.
17. Shimada K., Kai M. Calculating disability-adjusted life years (DALY) as a measure of excess cancer risk following radiation exposure // Journal of Radiological Protection. 2015. Vol. 35, № 4. P. 763–775. DOI: 10.1088/0952-4746/35/4/763.
18. Злокачественные новообразования в Санкт-Петербурге и других административных территориях Северо-Западного федерального округа России (заболеваемость, смертность, контингенты, выживаемость больных). Под ред. проф. А.М. Беляева, проф. Г.М. Манихаса, проф. В.М. Мерабишвили. СПб, 2016. 208 с.
19. Ахматдинов Р.Р., Библин А.М., Ахматдинов Р.Р. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021681915. Анализ пожизненных рисков возникновения радиационно-индуцированных раков в зависимости от пола и возраста при облучении у населения Российской Федерации по модели МКРЗ: № 2021681461: заявл. 22.12.2021; опубл. 27.12.2021.
20. Репин Л.В., Ахматдинов Р.Р., Репин В.С., Библин А.М. Реализация альтернативного метода определения значений взвешивающих множителей для тканей и органов при расчете эффективной дозы. Хроническое радиационное воздействие: отдаленные медико-биологические эффекты: материалы VII науч. конф. с междунар. участием, 6–8 декабря 2022 [сетевое научное издание] / Редкол.: А.В. Аклев (отв. ред.) и др. Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2022. С.129–130.
21. Ахматдинов Р.Р., Репин В.С., Библин А.М., Ахматдинов Р.Р. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022668256 Российская Федерация. Расчет коэффициентов радиочувствительности: № 2022667643: заявл. 29.09.2022; опубл. 04.10.2022; заявитель 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.

22. Рамзаев П.В. Риск реальный и мнимый // Сб. трудов «Радиационная гигиена». Л.: ЛНИИРГ, 1990. С. 7–19.
23. Кондрова Н.С., Шайхлисламова Э.Р., Ларионова Т.К., и др. Потерянные годы здоровой жизни вследствие профессиональных заболеваний у работников сельского хозяйства // Гигиена и санитария. 2022. Т. 101, № 1. С. 53–61. – DOI 10.47470/0016-9900-2022-101-1-53-61.
24. Thomsen S.T., Jakobsen L.S., Redondo H.G., et al. Burden of Disease of Dietary Exposure to Four Chemical Contaminants in Denmark, 2019 // Exposure and Health. 2022. Vol. 14. P. 871–883. DOI: 10.1007/s12403-022-00461-9.
25. Павлова С.С., Корнеев А.А., Дворянчиков В.В., и др. Оценка потерь здоровья населения в результате назальной обструкции на основе концепции глобального бремени болезни: общие подходы и направления исследований // Медицинский совет. 2021. № 12. С. 138–145. DOI: 10.21518/2079-701X-2021-12-138-145.
26. Velders G.J.M., Maas R.J.M., De Leeuw F.A.A.M., et al. Effects of European emission reductions on air quality in the Netherlands and the associated health effects // Atmospheric Environment. 2020. Vol. 221. P. 117109. DOI 10.1016/j.atmosenv.2019.117109.

Поступила: 07.02.2023 г.

Репин Леонид Викторович – младший научный сотрудник информационно-аналитического центра Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: leonid_repin@mail.ru

Для цитирования: Репин Л.В. Оценка радиационного ущерба для здоровья: о возможности использования эффективной дозы для расчета числа потерянных лет здоровой жизни // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 1. С. 52–65. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-52-65

Radiation detriment estimation: on the possibility of effective dose usage to assess the number of years of the healthy life lost

Leonid V. 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 Russian Law “On Radiation Safety of the Population” defines the effective dose as “the amount of exposure to ionizing radiation used as a measure of the risk of long-term consequences of human’s body exposure...” In turn, the Russian “Radiation Safety Standards” (RSS 99/2009) establish a procedure for assessing the health risk, associated with exposure to low doses, for two types of harmful effects (oncological diseases and hereditary effects) and two age and sex groups (“whole population” and “adults”) by multiplying corresponding linear risk coefficients per effective dose. At the same time, these documents do not impose restrictions on the risk assessment procedure, without excluding the use of any other risk indicators or risk assessment for other sex and age groups of the population. The value of radiation detriment to health, calculated by the method described in RSS 99/2009 to characterize the risk, as a unit of measurement, uses the fatal oncological disease caused by exposure to ionizing radiation, weighted by the number of years of life lost, or weighted by the severity of non-fatal cancer. Currently, mortality-based health measures are considered insufficiently informative characteristics of the impact of external factors on population health. Such indicators are poorly suited for a comparative analysis of risks, especially taking into account the different distribution of negative consequences over time. The paper presents an applied approach to expand the application of the radiation risk assessment methodology, without making significant changes to the established practice of radiation protection. The possibility of using the DALY value (disability-adjusted life years) as a measure of radiation risk is being considered; the expediency of changing approaches to calculating the effective dose (by using different values of weighting factors for tissues and organs during effective dose calculation for different age and sex groups of the population) and the possible scope of the proposed approaches to risk assessment in practice are discussed; an approach is proposed for calculating the DALY value using the effective dose and the corresponding risk factors ($DALY \times Sv^{-1}$).

Key words: radiation risk, radiation detriment, harm to health, DALY, risk measure, population health, risk indicator.

Leonid V. 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: leonid_repin@mail.ru

References

1. Ramzaev PV, Liberman AN. The principle of weighing "benefit-harm" and its application in radiation hygiene. Proceedings "Radiation hygiene". Leningrad: LNIIRG; 1982. P. 22-29. (In Russian).
2. Repin LV, Akhmatdinov RR, Biblin AM, Repin VS. On harmonization of health risk indicators caused by ionizing radiation exposure and other harmful factors based on DALY estimates. *Analiz riska zdorov'yu = Health Risk Analysis*. 2022;1: 170–183. DOI: 10.21668/health.risk/2022.1.18 (In Russian).
3. Repin LV, Akhmatdinov RR, Biblin AM, Repin VS. On harmonization of health risk indicators caused by ionizing radiation exposure and other harmful factors based on DALY estimates. *Analiz riska zdorov'yu = Health Risk Analysis*. 2022; 1:162-175. DOI 10.21668/health.risk/2022.1.18.eng.
4. The 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Annals of the ICRP* (1-3). Pergamon Press; 1991. 202 p.
5. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007;37(2-4): 332.
6. Publication 103 of the International Commission on Radiation Protection (ICRP): trans. from English. Eds.: M.F. Kiselyov, N.K. Shandala. Moscow, LLC PKF "Alana"; 2009. 312 p. (In Russian).
7. United Nations. Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR 2016 report to the General Assembly with scientific annexes. New York, N.Y.: United Nations; 2017.
8. Radiation detriment calculation methodology. ICRP. ICRP Publication 152. 2022. *Annals of the ICRP*. 2022;51(3): 103.
9. Ban N, Cléro E, Vaillant L, Zhang W, Hamada N, Preston D, et al. Radiation detriment calculation methodology: summary of ICRP Publication 152. *Journal of Radiological Protection*. 2022;42(2). doi: 10.1088/1361-6498/ac670d.
10. Cléro E, Vaillant L, Hamada N, Zhang W, Preston D, Laurier D, et al. History of radiation detriment and its calculation methodology used in ICRP Publication 103. *Journal of Radiological Protection*. 2019;39(3): R19-R36. doi: 10.1088/1361-6498/ab294a.
11. Zhang W, Laurier D, Cléro E, Hamada N, Preston D, Vaillant L, et al. Sensitivity analysis of parameters and methodological choices used in calculation of radiation detriment for solid cancer. *International Journal of Radiation Biology*. 2020;96(5): 596-605. DOI: 10.1080/09553002.2020.1708499.
12. Gorski AI, Chekin SYu, Maksyutov MA, Menyaylo AN, Korelo AM, Tumanov KA, et al. Transfer of ICRP models of radiation risk to the population of the Russian Federation. "Radiation and Risk" *Bulletin of the National Radiation and Epidemiological Registry*. 2019;28(4): 5–15. DOI: 10.21870/0131-3878-2019-28-4-5-15.
13. Ivanov VK, Chekin SYu, Kashcheev VV, Maksyutov MA, Korelo AM, Menyaylo AN. Effect of uncertainty of baseline incidence rates on estimating radiation risks with ICRP models for Russian populations following single exposure to radiation. "Radiation and Risk" *Bulletin of the National Radiation and Epidemiological Registry*. 2013;22(4): 40-56.
14. Mathers CD. History of global burden of disease assessment at the World Health Organization. *Archives of Public Health*. 2020;78(1). DOI: 10.1186/s13690-020-00458-3.
15. Federal state statistics service, Showcase of statistical data. URL: <https://showdata.gks.ru/report/278932> (Accessed 10.11.2022). (In Russian).
16. Malignant tumors in Russia in 2018 (morbidity and mortality). Moscow; 2019. 250 p. (In Russian).
17. Shimada K, Kai M. Calculating disability-adjusted life years (DALY) as a measure of excess cancer risk following radiation exposure. *Journal of Radiological Protection*. 2015;35(4): 763–775. DOI: 10.1088/0952-4746/35/4/763.
18. Belyaev AM, Manikhas GM, Merabishvili VM. Malignant tumors in St. Petersburg and other administrative territories of the North-West Federal District of Russia (morbidity, mortality, prevalence rate, survival). Express informatio. Second Issue. Saint-Petersburg; 2016; 208 p. (In Russian).
19. Analysis of lifetime risks of radiation-induced cancers depending on sex and age at exposure for Russian population according to the ICRP model. Certificate of state registration of the computer program, no. 2021681461 to 27.12.2021.
20. Repin LV, Akhmatdinov RR, Repin VS, Biblin AM. Implementation of alternative method of tissue weighting factors specification for effective dose calculation. In: A.V. Akleyev et al. (eds.) Chronic Radiation Exposure: late medical and biological effects Proceedings of the 7 th Scientific Conference with International Participation, 6–8 December 2022, Chelyabinsk: Chelyabinsk State University Publishing House; 2022. P.129-130 (In Russian).
21. Radiosensitivity coefficients calculation. Certificate of state registration of the computer program, no. 2022667643 to 04.10.2022.
22. Ramzaev PV. Risk real and imaginary. Proceedings "Radiation hygiene". Leningrad: LNIIRG; 1990. P. 7–19 (In Russian).
23. Kondrova NS, Shaykhlislamova ER, Larionova TK, Stepanov EG, Frants MV, Simonova NI. Disability-adjusted life years due to occupational diseases in agriculture workers. *Gigiena i sanitariya = Hygiene and sanitation*. 2022;101(1): 53–61. DOI 10.47470/0016-9900-2022-101-1-53-61 (In Russian).
24. Thomsen ST, Jakobsen LS, Redondo HG, Outzen M, Fagt S, Devleesschauwer B, et al. Burden of Disease of Dietary Exposure to Four Chemical Contaminants in Denmark, 2019. *Exposure and Health*. 2022;14(4): 871-883. DOI: 10.1007/s12403-022-00461-9.
25. Pavlova SS, Korneenkov AA, Dvoryanchikov VV, Ryazantsev SV, Ryazantseva ES, Donskaya OS. Assessment of population health losses due to nasal obstruction based on the concept of the global burden of disease: general approaches and research directions. *Meditsinskiy sovet = Medical Council*. 2021;(12): 138-145. DOI: 10.21518/2079-701X-2021-12-138-145 (In Russian).
26. Velders GJM, Maas RJM, Geilenkirchen GP, de Leeuw FAAM, Ligterink NE, Ruysenaars P, et al. Effects of European emission reductions on air quality in the Netherlands and the associated health effects. *Atmospheric Environment*. 2020;221: 117109. DOI 10.1016/j.atmosenv.2019.117109.

Received: February 07, 2023

For correspondence: Leonid V. Repin – 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 (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101; Russia. E-mail: leonid_repin@mail.ru)

For citation: Repin L.V. Radiation detriment estimation: on the possibility of effective dose usage to assess the number of years of healthy life lost. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 1. P. 52-65. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-52-65

Необоснованные направления на рентгенорадиологические исследования и их влияние на коллективную эффективную дозу пациентов в амбулаторных медицинских организациях

З.А. Лантух¹, Ю.А. Тлигулов¹, И.В. Солдатов¹, К.В. Толкачев¹, Ю.В. Дружинина^{1,2}, М.П. Шатёнок¹, С.А. Рыжов^{1,3}, Ю.А. Васильев¹

¹ Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

² Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Россия

³ Национальный медицинский исследовательский центр детской гематологии, онкологии и иммунологии имени Дмитрия Рогачева Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Россия

В последние годы ежегодно фиксируется увеличение коллективной дозы за счет медицинского облучения, что связано с повышением доступности высокотехнологичных методов медицинской помощи и увеличением их доли в структуре рентгенорадиологических исследований. Однако любое воздействие ионизирующего излучения на пациента связано с увеличением риска возникновения стохастических эффектов. Для обеспечения радиационной безопасности пациентов наиболее действенным является применение принципа обоснования. В статье подробно рассмотрен эксперимент по применению принципа обоснования в медицинских организациях. Целью исследования являлась оценка частоты возникновения необоснованных направлений на рентгенорадиологические исследования и их влияние на коллективную эффективную дозу пациентов в амбулаторных медицинских организациях. В результате было установлено, что коллективная доза от проведения исследований по необоснованным направлениям вносит 21% вклад в годовую коллективную дозу от рентгенорадиологических исследований в выбранных амбулаторных медицинских организациях. Полученный результат подтверждает необходимость обеспечения доступности информации о клинических рекомендациях, накопленной эффективной дозе и особенностях пациента в медицинских информационных системах, а также обосновывает значимость использования данной информации при назначении рентгенорадиологических исследований.

Ключевые слова: эффективная доза, принцип обоснования, медицинское облучение, коллективная эффективная доза.

Введение

С 2017 по 2021 г. произошло увеличение коллективной дозы от рентгенорадиологических исследований, проводимых в медицинских организациях г. Москвы, в 1,9 раз (рис. 1) [2–4]. Экспоненциальный рост применения компьютерной томографии (КТ) вызывает растущую озабоченность профессионального сообщества и привлекает внимание средств массовой информации во многих странах из-за повышения риска возникновения радиационно-индуцированных онкозаболеваний, особенно у людей, подвергающихся многократным повторным рентгенорадиологическим исследованиям [5]. Анализ имеющихся отчетных форм, в том числе радиационно-гигиенического паспорта г. Москвы за период 2017–2021 гг., показал, что процентный вклад в коллективную дозу рентгеновской компьютерной томографии за 5 лет вырос с 61% до 74%

[8]. Также следует обратить внимание на рост коллективной дозы от радионуклидной диагностики (РНД): так, только за 2021 г. коллективная доза от РНД выросла на 4%, что вызвано как увеличением числа исследований данного типа на 38% (более 45 000 исследований), так и ростом числа гибридных исследований, совмещенных с КТ, доза при которых существенно выше «классической» радионуклидной диагностики. Увеличение РНД-исследований во многом связано с улучшением обеспеченности ПЭТ/КТ жителей г. Москвы [6, 7], которая в настоящее время составляет 1,8 аппаратов на 1 млн постоянного населения.

При этом в 2021 г. общее количество рентгенорадиологических процедур вернулось к уровню 2017 г. после резкого сокращения по исследованиям профилактической флюорографии и рутинной рентгенографии в 2020 г., вызванного влиянием пандемии коронавирусной инфекции COVID-19 [8, 22].

Лантух Зоя Александровна

Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы

Адрес для переписки: Россия, 127051, Москва, ул. Петровка, д. 24, стр. 1; E-mail: z.lantukh@npcmr.ru

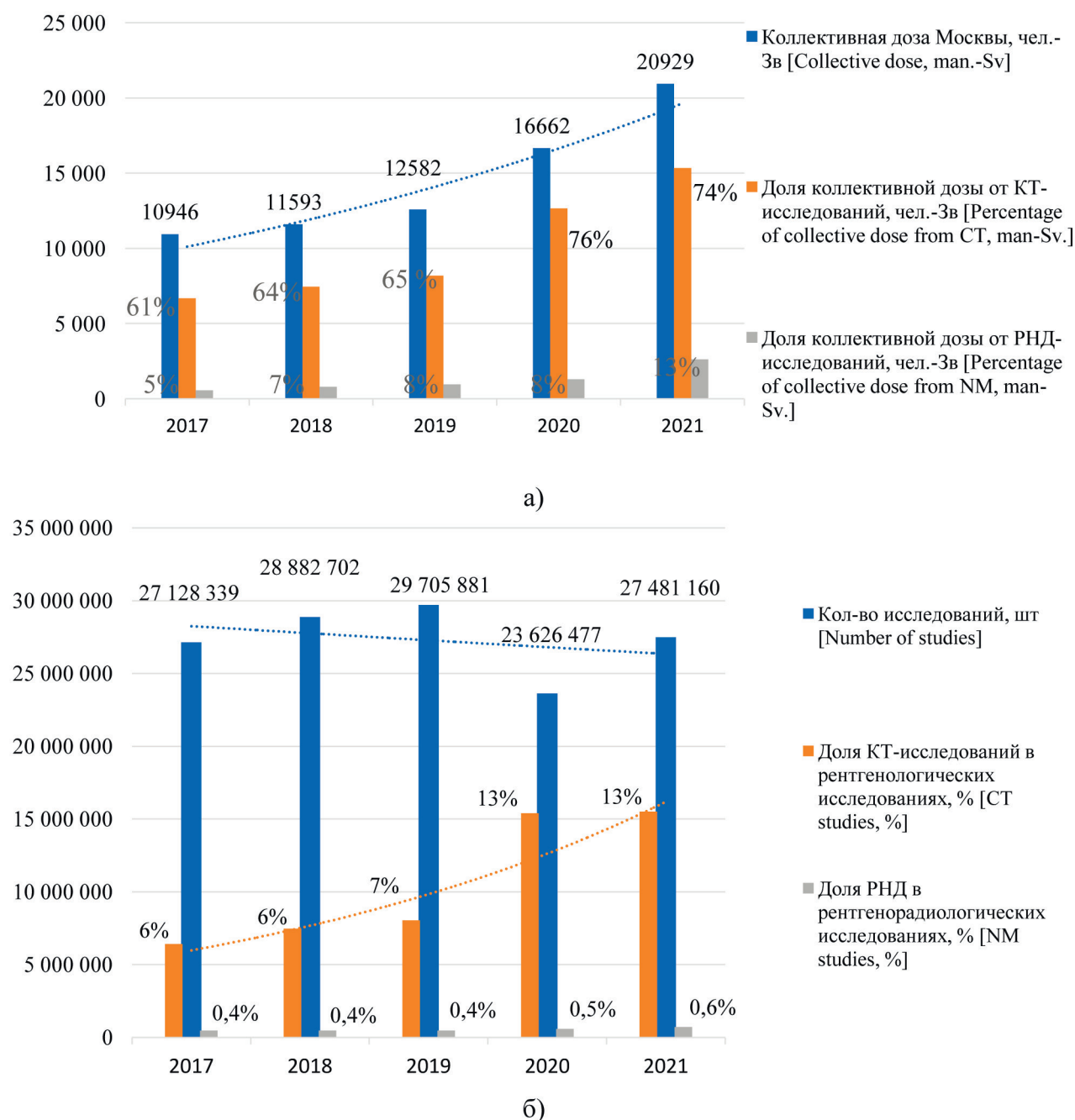


Рис. 1. Данные радиационно-технической паспортизации г. Москвы за 2017–2021 гг.:

а) коллективная эффективная доза; б) число исследований

[Fig. 1. Data of radiation and technical certification of Moscow for 2017–2021: a) collective effective dose; b) number of studies]

На коллегии Управления Роспотребнадзора г. Москвы, прошедшей в 2021 г., было акцентировано внимание специалистов на росте коллективной дозы от рентгенорадиологических исследований. Был поднят вопрос изучения целесообразности проведения такого количества рентгенорадиологических исследований и поиск путей контроля за необоснованными направлениями, приводящими к повторным исследованиям и излишней лучевой нагрузке на пациентов. Некорректные направления на рентгенорадиологические исследования в лучевой диагностике – это лу-

чевые диагностические процедуры, которые назначены не в соответствии с индивидуальной клинической ситуацией, клиническими рекомендациями, стандартами медицинской помощи, иными нормативными и правовыми актами органов исполнительной власти в сфере здравоохранения, регулирующими назначение тех или иных диагностических процедур. По мнению ряда российских ученых, в среднем 5% исследований в медицинских организациях назначаются необоснованно, в структуре которых: 8% исследований при постановке или уточнении диагноза; 10% исследований

при контроле эффективности лечения [9]. Зарубежный опыт показывает, что доля необоснованных исследований варьирует от 20% до 77% [10]. Джеймс У. Райан в 2019 г. провел ретроспективный аудит 1124 направлений на рентгенографические исследования согласно рекомендациям iRefer, который показал 784 необоснованных исследования с суммарной эффективной дозой 65,1 мЗв [11]. Оценка назначений рентгенорадиологических исследований в отоларингологии [12] показала, что 34,4% годового объема назначений в двух испанских больницах (всего 538 исследований) были признаны некорректными, а их доза облучения составила 40% от общей годовой дозы 877,8 мЗв.

В соответствии с российским законодательством¹ корректность направления и проведения рентгенологического исследования определяется принципом обоснования с учетом следующих требований:

- приоритетное использование альтернативных (нерадикационных) методов;
- проведение рентгенодиагностических исследований только по клиническим показаниям;
- выбор наиболее щадящих методов рентгенологических исследований;
- риск отказа от рентгенологического исследования должен заведомо превышать риск от облучения при его проведении.

Практика применения данных требований в ежедневной работе медицинских организаций стала одной из основных задач данного исследования.

При этом, согласно приказу Минздрава России², контроль корректности заполнения и правильность направления на диагностические исследования осуществляется страховыми медицинскими организациями и территориальными фондами ОМС. По результатам данного контроля выявленные нарушения являются основанием для отказа в оплате медицинской помощи (уменьшения оплаты медицинской помощи). Экономические потери учреждения от проведенных необоснованных исследований составляют в среднем 1,5% от затрат учреждения на диагностическую службу в год [9].

Цель исследования – оценить частоту и влияние необоснованных направлений на рентгенорадиологические исследования на коллективную эффективную дозу пациентов в амбулаторных медицинских организациях.

Материалы и методы

Исходя из цели исследования, основным материалом научного анализа послужили направления на рентгенологические исследования, выданные пациентам в медицинских организациях, подведомственных Департаменту здравоохранения г. Москвы (ДЗМ), оказывающих первичную медико-санитарную помощь. В соответствии

с существующими правилами все направления на рентгенорадиологические исследования для проведения диагностики или оценки хода лечения выдаются врачами-клиницистами в электронном виде в рамках Единой медицинской информационно-аналитической системы города Москвы (ЕМИАС). В качестве периода наблюдения был взят 2021 г. Всего за указанный период врачами-клиницистами было выдано более 5,9 млн направлений, из них в амбулаторном звене ДЗМ, представленном 85 медицинскими организациями, – 5 349 805 направлений.

При проведении исследования были определены критерии исключения из генеральной совокупности, связанные с нормализацией показателей до среднего многолетнего значения и учета динамики прироста количества исследований. Таким образом, в исследование были включены все доступные в ЕМИАС направления на рентгенорадиологические исследования за 2021 г.: РНД, компьютерная томография (КТ), маммография (ММГ), флюорография (ФЛГ), рентгенография (РГ). Ограничения кодов направительных диагнозов и половозрастные ограничения не накладывались. В исследование не включались направления на ангиографические исследования, направления на позитронно-эмиссионную томографию, также для исключения влияния COVID-19 были исключены направления на компьютерную томографию грудной клетки.

Для проведения исследования из основной совокупности направлений на рентгенологические исследования из системы ЕМИАС в 2021 г., с учетом ранее приведенных критериев, с помощью калькулятора [13] был проведен расчет выборки, результаты которого представлены в таблице 1. Были выбраны 1897 направлений на рентгенологические исследования в ЕМИАС. Выбор конкретных направлений проводимого исследования был осуществлен случайным образом для каждой модальности.

Основным методом анализа выборки был выбран метод экспертной оценки. Для проведения аудита была создана рабочая группа, которая включала 20 экспертов в разных областях лучевой диагностики с квалификацией врача-рентгенолога, ученым званием кандидата медицинских наук или стажем работы по специальности не менее 5 лет, прошедших обучение по радиационной безопасности.

Для создания методологии аудита были поставлены следующие задачи:

- оценить соответствие направлений на рентгенорадиологические исследования клиническим рекомендациям и стандартам медицинской помощи (КР и С);
- оценить соответствие направлений на рентгенорадиологические исследования нормативным правовым актам г. Москвы (НПА г. Москвы);
- оценить соответствие направлений на рентгенорадиологические исследования индивидуальной клинической ситуации пациента и наличие клинических показаний;

¹ Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.1192-03 «Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований» [Sanitary Regulations and Standards SanPiN 2.6.1.1192-03 «Hygienic requirements for the organization and operation of X-ray rooms, equipment and X-ray examinations» (In Russ)].

² Приказ МЗ РФ от 19.03.2021 г. № 231н «Об утверждении Порядка проведения контроля объемов, сроков, качества и условий предоставления медицинской помощи по обязательному медицинскому страхованию застрахованным лицам, а также ее финансового обеспечения» [Order of the Ministry of Health of the Russian Federation dated March 19, 2021 No. 231n "On approval of the Procedure for monitoring the scope, terms, quality and conditions of medical care for compulsory medical insurance to insured persons, as well as its financial support" (In Russ)].

Формирование выборки исследования

Таблица 1

[Table 1]

Study sampling]			
Модальность [Modality]	Количество направлений в ЕРИС в 2021 г., шт. [Number of referrals in ERIS in 2021]	Размер выборки направлений, шт. [Sample size]	Размер выборки направлений, после обработки экспертами, шт. [Sample size after processing by experts]
РНД [NM]	5884	377	373
КТ [CT]	329 362	384	365
ММГ [MMG]	829 900	384	360
ФЛГ [X-ray chest]	1 759 620	384	332
РГ [X-ray]	2 452 927	384	374
Всего [Total]	5 377 693	1 897	1804

– оценить возможность врача-рентгенолога выявить исследование с особенностями с точки зрения радиационной безопасности.

Схема аудита представлена на рисунке 2.

Вначале экспертами проводилась проверка кода МКБ-10, указанного в направлении. При условии отсутствия клинических рекомендаций на сайте «Рубрикатор клинических рекомендаций» [14] или стандартов медицинской помощи [15], а также недостаточности информации о пациенте в системе ЕМИАС направление с данным кодом МКБ-10 исключалось из выборки. В результате выборка сократилась на 93 (5%) направления.

К необоснованным эксперты относили направления, наименование лучевого исследования которых отсутствовало в клинических рекомендациях по данному коду МКБ-10, стандартах медицинской помощи или клиентских путях регионального уровня приказа ДЗМ от 14 января 2022 г. № 16 «Об организации оказания медицинской помощи по профилю «Онкология» в медицинских органи-

зациях государственной системы здравоохранения города Москвы» (с изменениями на 3 октября 2022 г.).

С точки зрения радиационной безопасности пациента экспертам предлагалось рассмотреть направление на рентгенорадиологическое исследование в отношении наличия или отсутствия особенностей в анамнезе пациента. Для экспертов на выбор был предоставлен список условий отнесения направлений к особым:

1. Наличие суммарной дозовой нагрузки пациента от рентгенорадиологических исследований более 500 мЗв.
2. Наличие беременности пациентки на период выдачи направления.
3. Прочие особенности назначения рентгенорадиологического исследования по части радиационной защиты пациента.

Результаты аудита фиксировались в таблицу и обрабатывались с помощью программы Excel и PASS 15.0.

Эффективная доза пациента при проведении рентгенорадиологических исследований рассчитывается по методикам, указанным в методических рекомендациях^{3,4,5}.



Рис. 2. Блок-схема аудита необоснованных направлений
[Fig. 2. The audit of unjustified referrals flowchart]

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». М.: Роспотребнадзор, 2019. 17 с. [Methodical guidelines 2.6.1.3584-19, Amendments to Methodical guidelines 2.6.1.2944-11 «Control of the patient effective doses from medical X-ray examinations» Moscow, Rosпотребнадзор, 2019, 17 p. (In Russ.)]

⁴ МУ 2.6.1.2944-11. «Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований». М.: Роспотребнадзор, 2011. 40 с. [Methodical guidelines 2.6.1.2944-11 «Control of the patient effective doses from medical X-ray examinations». Moscow, Rosпотребнадзор, 2011, 40 p. (In Russ.)]

⁵ МУ 2.6.1.3151-13. «Оценка и учет эффективных доз у пациентов при проведении радионуклидных диагностических исследований». М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2014. 36 с. [Methodical guidelines 2.6.1.3151-13. Assessment and control of the patient effective doses from nuclear medicine examinations. Moscow, Federal Center of Hygiene and Epidemiology of Rosпотребнадзор, 2014, 36 p. (In Russ.)]

По каждому исследованию, проведённому по необоснованному направлению, определялась эффективная доза пациента. Далее эффективные дозы пациентов за исследования суммировались для получения коллективной дозы. Также в работе использовались принципы и методы математического моделирования для оценки коллективной дозы от необоснованных исследований.

Данные для включения в модель оценки коллективной дозы амбулаторных медицинских организаций были получены из отчетности № 3-ДОЗ за 2021 г. Отчетная форма № 3-ДОЗ – форма федерального государственного статистического наблюдения, которая используется Роспотребнадзором для сбора сведений о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгенорадиологических исследований в целях защиты благополучия граждан Российской Федерации. В соответствии с Федеральным законом⁶ и Постановлением Правительства⁷ всеми юридическими лицами, использующими источники ионизирующего излучения в медицинских диагностических целях, и всеми медицинскими организациями, имеющими источники

ионизирующего облучения, ежегодно заполняется форма № 3-ДОЗ. В отчет № 3-ДОЗ входит информация о проведенных диагностических исследованиях и коллективных дозах, полученных пациентом при исследовании.

Результаты исследования

В результате аудита необоснованных направлений экспертами было выявлено 335 направлений на рентгенорадиологические исследования. Распределение по модальностям представлено в таблице 2. Доля необоснованных направлений составила от 6,6% до 37,8%.

Причины необоснованности направлений были определены в соответствии с разработанной методикой, описанной на рисунке 2. Распределение необоснованных направлений на рентгенорадиологические исследования представлено в таблице 3.

При рассмотрении направлений на рентгенорадиологические исследования экспертами рабочей группы по критерию радиационной безопасности анализировалось наличие 3 признаков:

Таблица 2

Распределение необоснованных направлений по модальностям

[Table 2]

The distribution of unjustified studies by modality			
Модальность [Modality]	Размер выборки направлений, после обработки экспертами, шт. [Sample size after processing by experts, number of studies]	Число и доля необоснованного направления, шт. [Number and percentage of unjustified studies]	Доверительный интервал при доверительной вероятности 95% [95% confidence limit]
РНД [NM]	373	72 (19,3%)	(14,4%; 24,2%)
КТ [CT]	365	138 (37,8%)	(32,7%; 42,9%)
ММГ [MMG]	360	63 (17,5%)	(12,3%; 22,7%)
ФЛГ [X-ray chest]	332	22 (6,6%)	(1,2%; 12%)
РГ [X-ray]	374	40 (10,7%)	(5,6%; 15,8%)
Всего [Total]	1804	335 (18,6%)	–

Таблица 3

Причины необоснованности направлений и их количество в отношении каждой модальности

[Table 3]

The reasons caused unjustified referrals and number of referrals by modality							
№	Причина необоснованности [The reason]	КТ [CT]	РНД [NM]	ММГ [MMG]	РГ [X-ray]	ФЛГ [X-ray chest]	Всего [Total]
1	Несоблюдение КР и С [Not following clinical recommendations and standards]	91	29	4	5	–	129
2	Отсутствие клинических показаний с доказательной базой [Lack of evidence-based clinical indications]	38	17	6	35	2	98
3	Несоблюдение НПА г. Москвы [Non-compliance with legal acts of Moscow]	9	26	53	–	19	107

⁶ Федеральный закон «О радиационной безопасности населения» № 3-ФЗ от 09.01.1996 г. (Редакция от 11.06.2021 г. Действует с 01.07.2021 г.) [Federal Law «On Radiation Safety of the Population» N 3-FZ dated 09.01.1996 (Edition dated 06.11.2021 – Valid from 07.01.2021) (In Russ)].

⁷ Постановление Правительства Российской Федерации от 16.06.1996 г. № 718 «О порядке создания единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан» [Decree of the Government of the Russian Federation dated June 16, 1996 No. 718 «On the establishment of a unified state system for control and registration of the citizen's individual doses». (In Russ)]

№	Причина необоснованности [The reason]	КТ [CT]	РНД [NM]	ММГ [MMG]	РГ [X-ray]	ФЛГ [X-ray chest]	Всего [Total]
4	Противопоказания по другой причине* [Contraindications for other reasons*]	–	–	–	–	1*	1
5	Всего [Total]	138	72	63	40	22	335

* по мнению эксперта, пациентке слишком часто назначали рентгенорадиологические исследования [* according to the expert, the patient was prescribed radiological examinations too often].

1. Наличие накопленной дозовой нагрузки пациента от рентгенорадиологических исследований более 500 мЗв.

В ходе аудита не было зафиксировано случаев превышения суммарной лучевой нагрузки более 500 мЗв ни у одного пациента. На данный результат также повлиял доступный инструментарий и содержание системы ЕМИАС, а именно затрудненный поиск информации об эффективной дозе пациента за проведенное исследование и наличие листов дозовой нагрузки в электронном виде только у некоторых пациентов. Однако в выборку попал 1 пациент с числом рентгенорадиологических исследований за 2021 г. – 12 шт., суммарная доза годового облучения которого составила 107,8 мЗв. При этом в течение 2021 г. данному пациенту было назначено 15 исследований, 3 из которых не были проведены. Количество направлений на рентгенорадиологические исследования данному пациенту обосновывается онкологическим анамнезом.

2. Наличие беременности на период выдачи направления.

В ходе аудита зафиксированы 2 направления, выданные в период беременности пациенток. Случаи описаны в таблице 4. Для исследований были рассчитаны эффективные дозы за процедуру, оценка поглощенной дозы в плоде не проводилась.

3. Врачи-эксперты не выявили прочие особенности назначения рентгенорадиологических исследований в части радиационной безопасности.

Оценка коллективной дозы от рентгенорадиологических исследований, проведенных по необоснованным направлениям, в выборке аудита

Для оценки коллективной дозы пациентов по необоснованным направлениям необходимо установить, все ли необоснованные направления выполнялись и, следовательно, действительно несли дополнительную лучевую нагрузку для пациента.

В таблице 5 приведены результаты проверки проведения исследований по направлениям, которые врачи-эксперты рабочей группы отметили как «необоснованные».

Таблица 4

Случаи назначения исследования беременным женщинам

[Table 4]

Cases of prescribing a study to pregnant women]

№	Описание пациентки [Patient description]	Назначенное исследование [Prescribed study]	Статус назначения [Status]	Срок беременности, на котором проведено исследование [Gestation period, when study was conducted]	Эффективная доза за процедуру, мЗв [Effective dose per procedure, mSv]
1	Пациентка, до 30 лет [Patient, under 30 years old]	Рентгенография околоносовых пазух [X-ray of the paranasal sinuses]	Исполнено [Done]	Исследование проведено во втором триместре [Second trimester]	0,07
2	Пациентка, до 30 лет [Patient, under 30 years old]	Флюорография легких профилактическая [X-ray chest screening]	Исполнено [Done]	Исследование проведено на ранних сроках беременности [Early pregnancy]	0,04

Таблица 5

Статистика выполнения необоснованных направлений

[Table 5]

Statistics of unjustified referrals fulfillment]

№	Параметр [Parameter]	Модальность					Всего направлений [Total]
		КТ [CT]	РНД [NM]	ММГ [MMG]	РГ [X-ray]	ФЛГ [X-ray chest]	
1	Размер выборки направлений, шт. [Study sample size]	365	373	360	374	332	1804
2	Число необоснованных направлений, шт. [Number of unjustified studies]	138	72	63	40	22	335

№	Параметр [Parameter]	Модальность					Всего направлений [Total]
		КТ [CT]	РНД [NM]	ММГ [MMG]	РГ [X-ray]	ФЛГ [X-ray chest]	
3	Число выполненных в ЕРИС направлений – число исследований, шт. [Number of completed referrals in ERIIS – num- ber of studies]	110	43	44	31	15	243
4	Доля выполненных необоснованных направлений, % [Percentage of completed unjustified referrals, %]	79,7	59,7	69,8	77,5	68,2	72,5

В результате проверки более 72,5% необоснованных направлений было реализовано.

Результаты оценки коллективной дозы представлены в таблице 6.

Характеристика коллективных доз показывает, что более 92% занимает коллективная доза, вносимая компьютерными томографиями. Меньше всего в коллективную дозу был вклад от флюорографий – 0,03%.

Оценка коллективной дозы от рентгенорадиологических исследований, проведенных по необоснованным направлениям в амбулаторных медицинских организациях г. Москвы

Структура амбулаторных медицинских организаций ДЗМ включает 45 взрослых амбулаторно-поликлинических центров, в составе каждого из которых находится не-

сколько филиалов, и 40 детских городских поликлиник. Номенклатура наименований рентгенологических исследований включает такие модальности, как КТ, РГ, ММГ, ФЛГ. Для соблюдения условий проведения аудита и возможности оценки объема необоснованных направлений из общего числа было проведено исключение направлений на компьютерную томографию органов грудной клетки.

Оценка коллективной дозы амбулаторных медицинских организаций проводилась по данным отчетности № 3-ДОЗ за 2021 г. (табл. 7).

Разработка модели оценки коллективной дозы от необоснованных исследований

Если рассмотреть общий объем направлений в системе ЕМИАС, то из 5 786 068 направлений на рентгенорадио-

Определение коллективной дозы за проведенные необоснованные исследования

Таблица 6

[Table 6]

The collective dose for the conducted unjustified studies]

Модальность [Modality]	Число выполненных направлений – число исследований, шт. [Number of completed re- ferrals – number of studies]	Коллективная доза за необоснованные исследования, чел.-Зв [Collective dose for unjusti- fied studies, man-Sv]	Средняя эффективная доза за необоснованное исследование, мЗв [Average effective dose for an unjustified study, mSv]	Доля от коллективной дозы, чел.-Зв за необоснованные исследования, % [Percentage of the collective dose, man-Sv for unjustified studies]
КТ [CT]	110	1,950	17,72	92,90%
РНД [NM]	43	0,136	3,16	6,48%
ММГ [MMG]	44	0,008	0,18	0,38%
РГ [X-ray]	31	0,005	0,16	0,24%
ФЛГ [X-ray chest]	15	0,001	0,04	0,03%
Всего [Total]	243	2,099	8,63	100%

Таблица 7

Коллективная доза амбулаторных медицинских организаций ДЗМ в 2021 г. по отчетности №3-ДОЗ

[Table 7]

Collective dose of outpatient medical organizations (OMO) of the DZM in 2021 according to 3-DOZ reporting]

Модальность [Modality]	Число процедур по №3-ДОЗ в АПЦ в 2021 г., шт. [Number of procedures according to 3-DOZ OMO in 2021]	Коллективная доза по №3-ДОЗ АПЦ за 2021 г., чел.-Зв [Collective dose according to 3-DOZ OMO in 2021, man-Sv.]	Средняя доза за исследование по №3-ДОЗ за 2021 г., мЗв [Average dose per study according to 3-DOS in 2021, mSv.]
КТ [CT]	105 273	234,48	2,23

Модальность [Modality]	Число процедур по №3-ДОЗ в АПЦ в 2021 г., шт. [Number of procedures according to 3-DOZ OMO in 2021]	Коллективная доза по №3-ДОЗ АПЦ за 2021 г., чел.-Зв [Collective dose according to 3-DOZ OMO in 2021, man-Sv.]	Средняя доза за исследование по №3-ДОЗ за 2021 г., мЗв [Average dose per study according to 3-DOS in 2021, mSv.]
ММГ [MMG]	6 255 268	358,88	0,057
РГ [X-ray]			
ФЛГ [X-ray chest]	3 588 354	135,87	0,037
Всего [Total]	9 948 895	1088,11	–

* АПЦ – амбулаторно-поликлинический центр.

гические исследования, выданных в 2021 г., 90% приходится на направления в амбулаторные медицинские организации и только 10% – в стационары. В связи с тем, что направления, создаваемые в стационарах в системе ЕМИАС, относятся к поликлиническим отделениям стационара и по видам исследований и методике не отличаются от проводимых в амбулаторных организациях, разделение доли необоснованных направлений по типам медицинских организаций не проводилось. Для оценочного расчета необоснованных исследований в амбулаторных медицинских организациях ДЗМ была разработана модель, указанная в формулах (1, 2):

$$T_{\text{необосн.}} = N \times a \times b, \quad (1)$$

$T_{\text{необосн.}}$ – число необоснованных исследований, шт.;
 N – число направлений в модальности, шт.;
 a – доля необоснованных направлений в модальности, % (см. табл. 1);
 b – доля выполнения необоснованных направлений в модальности, % (см. табл. 5);

$$D = \frac{T_{\text{необосн.}} \times D_{\text{ср.м.}}}{1000}, \quad (2)$$

$D_{\text{ср.м.}}$ – средняя эффективная доза по модальности по данным №3-ДОЗ в 2021 г., мЗв;

D – коллективная доза, чел.-Зв.

В формуле (1) использовался параметр a , b по отношению к каждой из модальностей: КТ, РГ, ММГ, ФЛГ. Коллективная доза от необоснованных направлений

рассчитывалась по средним дозам за исследование по данным отчетности № 3-ДОЗ за 2021 г. для выбранных медицинских организаций. Результаты расчета объема необоснованных направлений в 2021 г. и коллективной дозы от их проведения представлены в таблице 8.

В результате анализа было установлено, что коллективная доза от проведения исследований по необоснованным направлениям вносит 21% вклад в годовую коллективную дозу от рентгенорадиологических исследований в амбулаторных медицинских организациях ДЗМ.

Обсуждение и заключение

Результат по определению доли необоснованных направлений на рентгенорадиологические исследования (18,5%) отличается в меньшую сторону от показателей, приведенных в обзоре [9–12]. Однако их сравнение напрямую не может быть проведено ввиду различных определений «необоснованности» в данных исследованиях. Сформулированное в работе определение необоснованности направлений характерно для медицинских организаций Российской Федерации всех форм подчиненности, а методология аудита может быть применена в любом из отделений лучевой диагностики.

Полученный при помощи модели оценочный показатель годовой коллективной дозы от необоснованных исследований в амбулаторных организациях ДЗМ 230,75 чел.-Зв соизмерим с величиной годовой коллективной дозы в 2021 г. во всех медицинских организациях

Таблица 8

Оценка влияния необоснованных направлений на коллективную дозу амбулаторных медицинских организаций ДЗМ

[Table 8]

The impact of unjustified referrals on the collective dose of outpatient medical organizations of the DZM

Модальность [Modality]	Число направлений в АПЦ в 2021 г. [Number of referrals to the OMO in 2021]	Число необоснованных направлений в 2021 г. [Number of unjustified referrals in 2021]	Число необоснованных исследований при условии % выполнения из исследования [Number of unjustified studies considering % of completion]	Средняя эффективная доза за исследование по №3-ДОЗ за 2021 г. [Average eff. dose per study according to №3-DOS in 2021, mSv]	Коллективная доза от необоснованных направлений чел.-Зв. [Collective dose from unjustified referrals, man-Sv]
КТ [CT]	306 890	116 030	92 487	2,23	206,00
ММГ [MMG]	733 264	128 321	78 419		
РГ [X-ray]	2 182 581	233 431	114 863	0,057	22,03
ФЛГ [X-ray chest]	1 620 910	107 410	73 234	0,037	2,71
Всего [Total]	4 843 645	585 192	359 003	–	230,75

г. Москвы от цифровой флюорографии (294,98 чел.-Зв) и от пленочной рентгенографии (198,93 чел.-Зв). В отношении годовой коллективной эффективной дозы от проведения рентгенорадиологических исследований во всех медицинских организациях г. Москвы в 2021 г. – 20 929 чел.-Зв, полученная коллективная доза от необоснованных исследований занимает менее 1,5%.

Следует отметить, что врачами-экспертами при рассмотрении 1897 направлений на рентгенорадиологические исследования выявлено только 3 случая, по которым возникли вопросы по радиационной безопасности пациента. Приведенные случаи проведения рентгенорадиологических исследований беременным, хотя и не несут высокую дозовую нагрузку, могут быть ошибкой врача, не обладающего достаточной информацией для принятия решения о назначении. Согласно пункту 7.15 СанПиН 2.6.1.1192-03¹, при направлении женщин в детородном возрасте на рентгенологическое исследование лечащий врач уточняет время последней менструации с целью выбора времени проведения рентгенологической процедуры. Рентгенологические исследования желудочно-кишечного тракта, урографию, рентгенографию тазобедренного сустава и другие исследования, связанные с лучевой нагрузкой на гонады, рекомендуется проводить в течение первой декады менструального цикла. Информацию о беременности пациентки медицинский персонал получает непосредственно от пациента перед проведением исследования. По пункту 7.16 СанПиН 2.6.1.1192-03¹ направление беременных на рентгенологическое исследование производится только по клиническим показаниям. Исследования должны по возможности проводиться во вторую половину беременности, за исключением случаев, когда должен решаться вопрос о прерывании беременности или необходимости оказания скорой или неотложной помощи. При подозрении на беременность вопрос о допустимости и необходимости рентгенологического исследования решается, исходя из предположения, что беременность имеется.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что используемая МИС, если и обладала информацией о радиационной безопасности пациента на момент исследования, то данная информация представлена в неудобном для пользователя формате. Информация о суммарной дозовой нагрузке пациента, лист учета дозовой нагрузки, статус беременности, согласно ОСПОРБ-99/2010⁸, должны служить базисом для определения целесообразности проведения рентгенорадиологического исследования при назначении. Оценка суммарной дозовой нагрузки пациента врачом не представляется возможной в действующей системе. Статус беременности пациентки определялся экспертами только через описание консультаций

врача акушера-гинеколога и статус льготника, который напрямую не отражает беременность пациентки.

Согласно п.7.4 СанПиН 2.6.1.1192-03¹, окончательное решение о целесообразности, объеме и виде исследования принимает врач-рентгенолог, в случае отсутствия врача-рентгенолога решение принимает врач, направивший на рентгенологическое исследование, прошедший обучение по радиационной безопасности в учреждении, имеющем лицензию на образовательную деятельность в данной области. Большинство врачей-клиницистов не проходят такое обучение. В общедоступных источниках информации, в СПС Гарант, Консультант-плюс, Кодекс отсутствуют сведения об использовании п.7.4 СанПиН 2.6.1.1192-03¹ в правоприменительной практике, в том числе в деятельности контрольно-надзорных органов, страховых компаний, ФОМС, судебных органов. На практике же принятие решения о непроведении исследования врачом-рентгенологом осуществляется только при отсутствии направления по форме 057/у-04, что подтверждается п. 11 приказа Минздрава⁹, или статусом пациентки «Беременность», уточненным при беседе с пациенткой.

Исходя из вышеизложенного очевидно, что с увеличением числа рентгенологических исследований и таких положительных факторов для пациента, как появление новых медицинских организаций, обеспечение большей доступности проведения рентгенорадиологических исследований и увеличение эффективности работы отделений лучевой диагностики, необходимо введение в рутинную работу медицинской организации инструментов контроля за необоснованными направлениями.

Как показано в работе, инструментом контроля может являться периодический внешний выборочный аудит по методологии, описанной в данном исследовании. Однако, кроме внешнего выборочного аудита уже назначенных направлений, необходимо проводить работу по предупреждению необоснованных направлений на рентгенологические исследования. Необходимо внедрять в рабочую практику врачей-клиницистов использование методов доказательной диагностики, таких как принятие решений о назначении с учетом клинических рекомендаций, стандартов медицинской помощи, НПА г. Москвы или другого региона. Наилучшим способом использования методов доказательной диагностики является внедрение в практику систем поддержки и принятия врачебных решений.

В связи с возникающими у врача-рентгенолога и врача-клинициста проблемами поиска необходимой информации предлагается внести доработки в современные МИС:

1. Для обоснованного принятия решения о назначении рентгенорадиологического исследования врачом-клиницистом в МИС необходимо включать статус

⁸ Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 26.04.2010 г. № 40 (ред. от 16.09.2013 г.) «Об утверждении СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ99/2010)»» (зарегистрировано в Минюсте России 11.08.2010 г. № 18115) [Decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation of April 26, 2010 N 40 (amended on September 16, 2013) "On Approval of SR 2.6.1.2612-10 "Basic Sanitary Rules of Radiation Safety" (Registered in the Ministry of Justice of Russia on August 11, 2010 N 18115) (In Russ.)]

⁹ Приказ Министерства здравоохранения Российской Федерации от 09.06.2020 г. № 560н «Об утверждении Правил проведения рентгенологических исследований» (зарегистрирован 14.09.2020 г. № 59811) [Order of the Ministry of Health of the Russian Federation dated June 9, 2020 No. 560n "On approval of the Rules for conducting X-ray examinations" (Registered on September 14, 2020 No. 59811) (In Russ.)].

«Беременность» в панель быстрого доступа и постоянной видимости в электронной карте пациента.

2. Необходимо внедрение листа учета дозовой нагрузки пациента в электронную медицинскую карту и рутинную работу медицинского персонала в МИС. Заполнение листа учета дозовой нагрузки должно проходить автоматически после проведения исследования с минимальным участием сотрудников медицинской организации и исключением ручного ввода информации. Информацию об эффективной дозе, полученной пациентом, необходимо автоматически синхронизировать между заключением врача-рентгенолога, журналом рентгенорадиологических исследований рентгенодиагностического кабинета, листом учета дозовой нагрузки, а также с ежегодной отчетностью в управление Роспотребнадзора региона – формой № 3-ДОЗ. Ранее ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ» проводилось несколько работ по апробации программных продуктов для мониторинга дозы пациента [16–18] и были изданы методические рекомендации по внедрению и использованию подобных информационно-аналитических систем [19].

3. Для консультативно-методической поддержки врача-клинициста в медицинских информационных системах должна быть реализована система поддержки и принятия врачебных решений (СППВР), позволяющая автоматически давать подсказки по применимости актуальных клинических рекомендаций и стандартов медицинской помощи, а также отражающая требования нормативно-правовых актов региона. Данная система в обязательном порядке должна учитывать требования радиационной безопасности пациента. Аналогичные системы применяются в мировой практике, ярким примером является ESR iGuide [20], разработанная Европейским обществом радиологов на основании Американского общества рентгенологов ACR. Данная система предоставляет своим пользователям рекомендации по клиническим путям, основанные на последних медицинских исследованиях. Программное решение легко интегрируется в клинический рабочий процесс и IT-инфраструктуру. Использование ESR iGuide поддерживает и обучает направляющих врачей, а также дает пациентам уверенность в том, что они получают лучшее лечение. В результате применения СППВР около 25% направлений на лучевую диагностику либо являются необоснованными, либо могли быть сделаны с использованием более подходящего альтернативного метода [21].

Ограничения исследования

Важно заметить, что выбранные для аудита критерии отнесения направления к «необоснованным» не содержат оценку пользы проведенного исследования в истории болезни пациента. Ошибочно можно предположить, что проведение исследования по необоснованному направлению привело к пользе для здоровья пациента, так же, как и обратное утверждение. Исследование обоснованности с точки зрения ведения лечения пациента должно проводиться при фиксации нормы или выявления отклонений от нормы по результатам исследования.

При создании случайной выборки использовался равный объем исследований в каждой модальности, однако это не отражает реального распределения объема исследований отдельных модальностей, так как частота прове-

дения, например, рентгенографий не равна частоте проведения компьютерных томографий.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Наибольший вклад распределён следующим образом:

Лантух З.А. – дизайн исследования, поиск публикаций по теме, анализ литературы, обработка полученных результатов, написание текста;

Тлигунов Ю.А. – дизайн исследования, обработка полученных результатов, систематизация и редактирование статьи;

Солдатов И.В. – обработка полученных результатов, экспертная оценка списка литературы;

Толкачев К.В. – обработка полученных результатов, экспертная оценка списка литературы, редактирование статьи;

Дружинина Ю.В. – обработка полученных результатов, систематизация и редактирование статьи;

Шатенок М.П. – обработка полученных результатов, систематизация и редактирование статьи.

Рыжов С.А. – финальное редактирование статьи;

Васильев Ю.А. – финальное редактирование статьи.

Благодарности

Выражаем благодарность за помощь в проведении исследования экспертам рабочей группы главного внештатного специалиста по лучевой диагностике г. Москвы Ю.А. Васильева, в составе:

Бухтоярова Наталья Анатольевна, Хасанова Ксения Андреевна, Сергеев Александр Дмитриевич, Бажин Александр Владимирович, Вылегжанин Сергей Владимирович, Ляшенко Татьяна Викторовна, Барышов Владимир Иванович, Ковалева Алина Сергеевна, Мартиросян Элина, Куликова Евгения Александровна, Карпов Сергей Сергеевич, Лунин Максим Андреевич, Сытник Александр Алексеевич, Ульянова Виолетта Алексеевна, Василенко Елена Игоревна, Лычагин Александр Иванович, Амброси Ольга Евгеньевна, Мануйлова Ольга Олеговна, Денисенко-Канкия Елена Игоревна.

Информация о конфликте интересов

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Сведения об источнике финансирования

Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении поисково-аналитической работы.

Литература

1. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2017 год (радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации). М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2018. 67 с.
2. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2018 год

- (радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации). М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2019. 69 с.
3. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2019 год (радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации). М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2020. 63 с.
 4. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2020 год (радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации). М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2021. 66 с.
 5. Tonolini M., Valconi E., Vanzulli A., Bianco R. Radiation overexposure from repeated CT scans in young adults with acute abdominal pain // *Emergency radiology*. 2018. Vol. 25, No 1: P. 21-27. DOI: 10.1007/s10140-017-1554-y.
 6. Сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Радиационная гигиена и непрерывное профессиональное образование: новые вызовы и пути развития», посвященной 65-летию кафедры радиационной гигиены и радиационной безопасности имени академика Ф.Г. Кроткова. 27 октября 2022. под ред. А.В. Алехновича. Москва: Изд-во ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России, 2022. 112 с. ISBN – 978-5-7249-3278-3.
 7. Попова А.Ю., Водоватов А.В., Романович И.К., и др. Влияние пандемии COVID-19 на структуру лучевой диагностики и коллективные дозы населения Российской Федерации при медицинском облучении в 2020 г. // *Радиационная гигиена*. 2022. Т. 15, № 3. С. 6-39. DOI:10.21514/1998-426X-2022-15-3-6-39.
 8. Дружинина Ю.В., Рыжов С.А., Водоватов А.В., и др. Влияние COVID-19 на динамику изменений дозовой нагрузки на пациентов при проведении компьютерной томографии в медицинских организациях Москвы // *Digital Diagnostics*. 2022. Т. 3, № 1. С. 5-15. DOI:10.17816/DD87628.
 9. Беркут Н.Ю. Медико-экономическая оценка деятельности диагностической службы муниципального здравоохранения. Дисс... на соискание ученой степени канд. мед. наук: 14.00.33 // *Общественное здоровье и здравоохранение*, 2008. 195 с.
 10. Malone J., Guleria R., Craven C., et al. Justification of diagnostic medical exposures: some practical issues. Report of an International Atomic Energy Agency Consultation // *The British Journal of Radiology*. 2012. Vol. 85. P. 523-538.
 11. Ryan J.W., Hollywood A., Stirling A., et al. Evidenced-based radiology? A single-institution review of imaging referral appropriateness including monetary and dose estimates for inappropriate scans // *Irish Journal of Medical Science*. 2019. Vol. 188, No 4. P. 1385-1389. doi: 10.1007/s11845-019-02005-8. Epub 2019 Mar 14. PMID: 30875006.
 12. Almodóvar A., Ronda E., Flores R., Lumbrales B. Appropriateness of radiological diagnostic tests in otolaryngology // *Insights Imaging*. 2022. Vol. 13, No 1. P. 126. doi: 10.1186/s13244-022-01263-y. PMID: 35925527; PMCID: PMC9352825.
 13. Калькулятор размера выборки. URL: <https://niiroz.ru/mediko-sotsiologicheskie-issledovaniya/kalkulyator/> (Дата обращения: 19.10.2022).
 14. Рубрикатор клинических рекомендаций Министерства здравоохранения медицинских организаций. URL: <https://cr.minzdrav.gov.ru/> (Дата обращения: 15.10.2022).
 15. Реестр стандартов оказания медицинской помощи. URL: <https://docs.cntd.ru> (Дата обращения: 15.10.2022).
 16. Дружинина Ю.В., Рыжов С.А., Солдатов И.В., и др. Возможности применения специализированного программного обеспечения для замены отчетных форм // *Медицинская Физика*. 2022. № 1(93). С. 26-27.
 17. Шатенок М.П., Толкачев К.В., Рыжов С.А., и др. Сравнительный анализ программного обеспечения для автоматического мониторинга дозовой нагрузки при проведении рентгенологических исследований // *ОРГЗДРАВ: новости, мнения, обучение. Вестник ВШОУЗ*. 2020. Т. 6, № 3 (21). С. 88-90.
 18. Морозов С.П., Линденбротен Л.Д., Солдатов И.В., и др. Основы менеджмента медицинской визуализации // Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2020. 432 с.
 19. Соколов Е.Н., Лантух З.А., Дружинина Ю.В., и др. Применение аналитических информационных систем. Методические указания. Том. 122. Раздел 1. Система оценки персональных радиационных рисков облучения пациента при обосновании назначения рентгенологических и радионуклидных исследований. Сер. «Лучшие практики лучевой и инструментальной диагностики». Вып. 90. М.: ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», 2020. 24 с.
 20. Система поддержки принятия клинических решений для рекомендаций по направлению на процедуры визуализации ESR iGuide. URL: <https://www.myesr.org/esriguide> (Дата обращения: 15.10.2022).
 21. Donoso L., Brkljacic B. ESR iGuide – Clinical Decision Support for European Imaging Referral Guidelines. EuroSafe Imaging congress. 2017. URL: <https://dx.doi.org/10.1594/esi2017/ESI-0023>, DOI: 10.1594/esi2017/ESI-0023 (Дата обращения: 15.10.2022).
 22. Попова А.Ю., Водоватов А.В., Романович И.К., и др. Влияние пандемии COVID-19 на структуру лучевой диагностики и коллективные дозы населения Российской Федерации при медицинском облучении в 2020 г. // *Радиационная гигиена*. 2022. Т. 15, № 3. С. 6-39. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-3-6-39>.

Поступила: 26.12.2022 г.

Лантух Зоя Александровна – начальник отдела дозиметрического контроля и медицинской физики Научно-практического клинического центра диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы. **Адрес для переписки:** 127051, Россия, Москва, ул. Петровка, д. 24, стр. 1; E-mail: z.lantukh@npsmr.ru
ORCID® <https://orcid.org/0000-0001-6623-9610>

Тлигулов Юрий Арсенович – начальник организационно-методического отдела Научно-практического клинического центра диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия
ORCID® <https://orcid.org/0000-0002-6518-0546>

Солдатов Илья Владимирович – кандидат медицинских наук, начальник испытательной лаборатории Научно-практического клинического центра диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия
ORCID® <https://orcid.org/0000-0002-4867-0746>

Толкачев Кирилл Владимирович – эксперт отдела дозиметрического контроля и медицинской физики Научно-практического клинического центра диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия
ORCID® <https://orcid.org/0000-0001-8871-8700>

Дружинина Юлия Владимировна – эксперт отдела дозиметрического контроля и медицинской физики Научно-практического клинического центра диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы; преподаватель кафедры радиационной гигиены и радиационной безопасности им. Ф. Г. Кроткова Российской медицинской академии непрерывного профессионального образования Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Россия

ORCID[®] <https://orcid.org/0000-0002-3230-3722>

Шатёнок Мария Петровна – эксперт отдела дозиметрического контроля и медицинской физики Научно-практического клинического центра диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

ORCID[®] <https://orcid.org/0000-0001-9217-7011>

Рыжов Сергей Анатольевич – 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 Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Россия

ORCID[®] <https://orcid.org/0000-0002-0640-7368>

Васильев Юрий Александрович – кандидат медицинских наук, директор Научно-практического клинического центра диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

ORCID[®] <https://orcid.org/0000-0002-0208-5218>

Для цитирования: Лантух З.А., Тлигулов Ю.А., Солдатов И.В., Толкачев К.В., Дружинина Ю.В., Шатёнок М.П., Рыжов С.А., Васильев Ю.А. Необоснованные направления на рентгенорадиологические исследования и их влияние на коллективную эффективную дозу пациентов в амбулаторных медицинских организациях // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 1. С. 66-79. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-66-79

Unjustified referrals to radiological examinations and their impact on the collective effective dose of patients in outpatient medical organizations

Zoya A. Lantukh ¹, Yuriy A. Tligurov ¹, Ilya V. Soldatov ¹, Kirill V. Tolkachev ¹, Yuliya V. Druzhinina ^{1,2}, Mariya P. Shatenok ¹, Sergey A. Ryzhov ^{1,3}, Yuriy A. Vasilyev ¹

¹ Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow, Russia

² Russian medical academy Continuing professional education of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

³ Dmitry Rogachev National Medical Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

In recent years, an increase in the collective dose from medical exposure has been recorded annually, which is associated with an increase in the availability of high-tech methods of medical care and an increase of their percentage in the structure of X-ray studies. However, any exposure to ionizing radiation on a patient is associated with an increased risk of stochastic effects. The justification principle is the most effective to ensure the radiation safety of patients. The article considers in detail the experiment on the application of the justification principle in medical organizations. The aim of the study was to evaluate the incidence of unjustified referrals to radiological examinations and their impact on the collective effective dose of patients in outpatient medical organizations. As a result, it was found, that the collective dose from studies with unjustified referrals contributes 21% to the annual collective dose from X-ray studies in outpatient medical organizations. The result obtained confirms the need to ensure the availability of information on clinical recommendations, the accumulated effective dose and patient characteristics in medical information systems, and proves the importance of using this information when prescribing X-ray radiological studies.

Key words: effective dose, justification principle, medical exposure, collective effective dose.

Zoya A. Lantukh

Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies

Address for correspondence: Petrovka str., 24, building 1, Moscow, 127051, Russia; E-mail: z.lantukh@npcmr.ru

Authors' contribution

All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Zoya A. Lantukh – research design development, search for relevant publications, literature analysis, data processing, writing;

Yuriy A. Tligurov – research design development, data processing, systematization and final editing of the review;

Ilya V. Soldatov – expert evaluation of literature review;

Kirill V. Tolkachev – data processing, expert evaluation of literature review;

Yuliya V. Druzhinina – data processing, systematization and final editing of the review;

Mariya P. Shatenok – data processing, systematization and final editing of the review;

Sergey A. Ryzhov – final editing of the review;

Yuriy A. Vasilyev – final editing of the review.

Acknowledgments

We express our gratitude for the help in preparing the article for publication to specialist of working group of department radiology diagnostic of Moscow: Mihailov A.I., Buhtoyarova N.A., Hasanova X.A., Sergeev A.D., Baghin A.V., Vileggatanin S.V., Lyashenko T.V., Barishov V.I., Kovaleva A.S., Martirosyan E., Kulikova E.A., Karpov S.S., Lunin M.A., Sitnick A.A., Ulianova V.A., Vasilenko E.I., Lichagin A.I., Ambrosi O.E., Manuilova O.O., Denisenko-Kankiya E.I.

Competing interests

The authors declare that they have no competing interests.

Funding source

This article was not supported by any external sources of funding.

References

- Results of radiation-hygienic certification in the regions of the Russian Federation in 2017 (radiation-hygienic passport of the Russian Federation). Moscow: Federal Center of Hygiene and Epidemiology of the Federal Service for Surveillance on Human Well-being and Consumer Rights Protection; 2018. 67 p. (In Russian).
- Results of radiation-hygienic certification in the regions of the Russian Federation in 2018 (radiation-hygienic passport of the Russian Federation). Moscow: Federal Center of Hygiene and Epidemiology of the Federal Service for Surveillance on Human Well-being and Consumer Rights Protection; 2019. 69 p. (In Russian).
- Results of radiation-hygienic certification in the regions of the Russian Federation in 2019 (radiation-hygienic passport of the Russian Federation). Moscow: Federal Center of Hygiene and Epidemiology of the Federal Service for Surveillance on Human Well-being and Consumer Rights Protection; 2020. 63 p. (In Russian).
- Results of radiation-hygienic certification in the regions of the Russian Federation in 2020 (radiation-hygienic passport of the Russian Federation). Moscow: Federal Center of Hygiene and Epidemiology of the Federal Service for Surveillance on Human Well-being and Consumer Rights Protection; 2021. 66 p. (In Russian).
- Tonolini M, Valconi E, Vanzulli A, Bianco R. Radiation over-exposure from repeated CT scans in young adults with acute abdominal pain. *Emergency Radiology*. 2018;25(1): 21-27. DOI: 10.1007/s10140-017-1554-y.
- Book of abstracts of the All-Russian scientific and practical conference with international participation "Radiation hygiene and continuing professional education: new challenges and ways of development", dedicated to the 65th anniversary of the Department of Radiation Hygiene and Radiation Safety named after academician F.G. Krotkov. October 27, 2022. ed. A.V. Alekhovich. Moscow: Publishing House of FGBOU DPO RMANPO of the Ministry of Health of Russia; 2022. 112 p. ISBN-978-5-7249-3278-3. (In Russian).
- Popova AY, Vodovatov AV, Romanovich IK, Ryzhov SA, Druzhinina PS, Akhmatdinov RR. The impact of the COVID-19 pandemic on the structure of radiation diagnostics and collective doses of the population of the Russian Federation under medical irradiation in 2020. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(3): 6-39. DOI:10.21514/1998-426X-2022-15-3-6-39. (In Russian).
- Druzhinina YV, Ryzhov SA, Vodovatov AV, Soldatov IV, Lantukh ZA, Mukhortova AN, et al. Coronavirus disease-2019: Changes in computed tomography radiation burden across Moscow medical facilities. *Digital Diagnostics*. 2022;3(1): 5-15. (In Russian).
- Berkut NYu. Medical and economic assessment of the activities of the diagnostic service of municipal health. Dissertation for the degree of candidate of medical sciences: 14.00.33. Public health and health care; 2008. 195 p. (In Russian).
- Malone J, Guleria R, Craven C, Horton P, Järvinen H, Mayo J, et al. Justification of diagnostic medical exposures: some practical issues. Report of an International Atomic Energy Agency Consultation. *The British Journal of Radiology*. 2012;85(1013): 523-538. doi: 10.1259/bjr/42893576. Epub 2011 Feb 22. PMID: 21343316; PMCID: PMC3479887.
- Ryan JW, Hollywood A, Stirling A, Glynn M, MacMahon PJ, Bolster F. Evidenced-based radiology? A single-institution review of imaging referral appropriateness including monetary and dose estimates for inappropriate scans. *Irish Journal of Medical Science*. 2019;188(4): 1385-1389. doi: 10.1007/s11845-019-02005-8. Epub 2019 Mar 14. PMID: 30875006.
- Almodóvar A, Ronda E, Flores R, Lumbreras B. Appropriateness of radiological diagnostic tests in otolaryngology. *Insights Imaging*. 2022;13(1): 126. doi: 10.1186/s13244-022-01263-y. PMID: 35925527; PMCID: PMC9352825.
- Sample size calculator. Available from: <https://nizoz.ru/mediko-sotsiologicheskie-issledovaniya/kalkulyatory/> (Accessed: October 19, 2022) (In Russian).
- Rubricator of clinical recommendations of the Ministry of Health. Available from: <https://cr.minzdrav.gov.ru/> (Accessed: October 15, 2022) (In Russian).
- Register of medical care standards. Available from: <https://docs.cntd.ru> (Accessed: October 15, 2022) (In Russian).
- Druzhinina YV, Ryzhov SA, Soldatov IV, Lantukh ZA, Shatenok MP. Opportunity of special dose monitoring programme systems for changing the recording form. *Meditinskaya Fizika = Medical Physics*. 2022;1(93): 26-27. (In Russian).
- Shatenok MP, Tolkachev KV, Ryzhov SA, Druzhinina YV, Lantukh ZA. Comparison of automated dose monitoring systems for radiology. *ORGZDRAV: news, opinions, education. Vestnik VSHOUZ = Vestnik VSHOUZ*. 2020;6;3(21): 88-90. (In Russian).
- Morozov SP, Lindenbraten LD, Soldatov IV, Vladimirovsky AV, Basarboliev AV, et al. Fundamentals of medical visualization management. Moscow: GEOTAR-Media; 2020. 432 p. (In Russian).
- Sokolov EN, Lantukh ZA, Druzhinina YV, Kashcheev VV, Kurashvili YB, Morozov SP, et al. Application of analytical information systems. Methodical instructions. Volume. 122. Section 1. System for assessing the patient personal radiation risks for X-ray and nuclear medicine studies justification. Ser. Issue 90 Best Practices in Radiation and Instrumental Diagnostics; 2020. 24 p. (In Russian).

20. Clinical decision support system for imaging referral guidelines ESR iGuide. Available from: <https://www.myesr.org/esr-guide> (Accessed: October 15, 2022) (In Russian).
21. Donoso L, Brkljacic B. ESR iGuide – Clinical Decision Support for European Imaging Referral Guidelines. EuroSafe Imaging congress. 2017. Available from: <https://dx.doi.org/10.1594/esi2017/ESI-0023>, DOI: 10.1594/esi2017/ESI-0023 (Accessed: October 15, 2022).
22. Popova AY, Vodovatov AV, Romanovich IK, Ryzhov SA, Druzhinina PS, Akhmatdinov RR. The impact of the COVID-19 pandemic on the structure of radiation diagnostics and collective doses of the population of the Russian Federation under medical irradiation in 2020. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(3): 6-39. (In Russian). <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-3-6-39>.

Received: December 26, 2022

For correspondence: Zoya A. Lantukh – Head of department of dosimetry and medical radiation physics, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies. (Petrovka str., 24, building 1, Moscow, 127051, Russia; E-mail: z.lantukh@npcmr.ru)

ORCID[®] <https://orcid.org/0000-0001-6623-9610>

Yuriy A. Tligurov – PhD, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow, Russia

ORCID[®] <https://orcid.org/0000-0002-6518-0546>

Ilya V. Soldatov – Head of testing laboratory, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow, Russia

ORCID[®] <https://orcid.org/0000-0002-4867-0746>

Kirill V. Tolkachev – Expert of department of dosimetry and medical radiation physics, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow, Russia

ORCID[®] <https://orcid.org/0000-0001-8871-8700>

Yulia V. Druzhinina – Expert of department of dosimetry and medical radiation physics, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies; Lecturer of the Department of Radiation Hygiene and Radiation Safety named after. F.G. Krotkova of Russian Medical Academy of Continuous Professional Education, Moscow, Russia

ORCID[®] <https://orcid.org/0000-0002-3230-3722>

Mariya P. Shatenok – Expert of department of dosimetry and medical radiation physics, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow, Russia

ORCID[®] <https://orcid.org/0000-0001-9217-7011>

Sergey A. Ryzhov – Scientist, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies; Head of the radiation safety and medical physics department of Dmitry Rogachev National Medical Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology, Moscow, Russia

ORCID[®] <https://orcid.org/0000-0002-0640-7368>

Yuriy A. Vasiliev – CEO, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow, Russia

ORCID[®] <https://orcid.org/0000-0002-0208-5218>

For citation: Lantukh Z.A., Tligurov Yu.A., Soldatov I.V., Tolkachev K.V., Druzhinina Yu.V., Shatenok M.P., Ryzhov S.A., Vasilyev Yu.A. Unjustified referrals to radiological examinations and their impact on the collective effective dose of patients in outpatient medical organizations. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 1. P. 66-79. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-66-79

Продолжительность жизни у работников ПО «Маяк» после острой лучевой болезни разной степени тяжести

В.И. Тельнов, Т.В. Азизова, М.Б. Мосеева, М.В. Банникова

Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства, г. Озерск, Челябинская область, Россия

Оценка влияния радиационного воздействия на продолжительность жизни человека — актуальная проблема радиационной медицины. Целью исследования явился анализ продолжительности жизни в группе работников ПО «Маяк» после острой лучевой болезни, подвергшихся в результате аварийных ситуаций острому внешнему облучению в значительных дозах, и участников аварий без заболевания. Анализ проведен у 58 умерших работников ПО «Маяк» (50 мужчин и 8 женщин) с помощью программы STATISTICA 10. Изучены 5 показателей продолжительности жизни: статичные — до и после острого облучения, общая продолжительность жизни, а также потенциальные — потерянные годы потенциальной жизни и доля лиц, проживших менее 35 лет. В результате исследования у работников с тяжелой и особенно крайне тяжелой степени болезни относительно работников средней и легкой степени тяжести заболевания и участников аварий установлено статистически значимое сокращение статичных показателей, за исключением продолжительности жизни до острого облучения, и повышение потенциальных показателей. Причиной сокращения продолжительности жизни при крайне тяжелой степени заболевания было его экстремальное течение. При тяжелой степени тяжести сокращение продолжительности жизни было обусловлено, главным образом, преждевременной смертностью от злокачественных новообразований. Установлена статистически значимая линейная регрессионная зависимость показателей продолжительности жизни от натурального логарифма дозы острого облучения. На 1 логарифм дозы облучения продолжительность жизни после острого облучения сокращалась на 8,3 лет, общая — на 8,8 лет, а потерянные годы потенциальной жизни повышались на 8,4 лет. Относительный риск повышения доли работников, проживших менее 35 лет при заболевании тяжелой и крайне тяжелой степени тяжести, а также при дозах острого облучения более 10 Гр по сравнению с остальными работниками, был существенно повышен, составив 26,8 и 18,8 (ДИ: 3,8–191,1 и 2,7–129,8; $p < 0,001$) соответственно. Таким образом, у работников ПО «Маяк» впервые установлено сокращение продолжительности жизни после острой лучевой болезни.

Ключевые слова: работники ПО «Маяк», острое внешнее облучение, острая лучевая болезнь, причины смерти, продолжительность жизни, регрессионный анализ, относительный риск.

Введение

Продолжительность жизни (ПЖ) как интегральный показатель исторически и в настоящее время отражает многие аспекты уровня и качества жизни, включая здоровье населения, социально-экономические условия его проживания, характер старения, а также многие другие [1, 2]. Снижение ПЖ может быть вызвано воздействием неблагоприятных факторов различной природы [3, 4]. Изучение воздействия ионизирующего излучения на ПЖ представляет важную задачу радиационной медицины и демографии. На начальном этапе в экспериментальных исследованиях данной проблемы было показано, что сокращение ПЖ является универсальным эффектом разных видов радиационного воздействия [5, 6]. Значимые результаты, свидетельствующие о сокращении ПЖ после внешнего и внутреннего облучения, были получены: в когортах аме-

риканских и британских радиологов [7, 8]; в японской когорте LSS (Life Span Study) лиц, подвергшихся облучению в результате атомной бомбардировки [9]; у рисовальщиц циферблатов и у больных туберкулезом костей или анкилозирующим спондилитом, которые подверглись воздействию радия, в том числе в результате лечения [10–12]; в когорте работников производственного объединения (ПО) «Маяк», подвергшихся инкорпорации плутония-239 [13, 14]. В последние годы в этой когорте были получены данные о сокращении продолжительности здоровой жизни [15].

В отличие от перечисленных выше исследований, остается не изученной проблема ПЖ у людей после острой лучевой болезни (ОЛБ). К настоящему времени в мире накоплен огромный медико-дозиметрический объем материалов по изучению ОЛБ [16–19]. Однако све-

Азизова Тамара Васильевна

Южно-Уральский институт биофизики

Адрес для переписки: 456783, Россия, г. Озерск, Челябинская область, Озерское шоссе, д. 19; E-mail: clinic@subi.su

дения об оценке ПЖ при ОЛБ разной степени тяжести в доступной литературе отсутствуют. По-видимому, трудности в изучении данной проблемы связаны, в первую очередь, с тем, что, как правило, для анализа исследователи располагали очень небольшими по численности группами и недостаточно полными, а иногда и отсутствующими данными медицинского наблюдения. Во вторую очередь, это обусловлено необходимостью практически полной убыли представителей исходной группы с ОЛБ, что позволяет добиться максимально возможной численности индивидов (силы мощности исследования) при анализе ПЖ. Для изучения эффектов и последствий острого облучения был создан регистр ОЛБ, развившейся у работников в результате кратковременного облучения высокой мощности во время радиационных аварий на ПО «Маяк» [20, 21]. Важно подчеркнуть, что для более полного анализа проблемы необходимо использовать не только статические, но и потенциальные показатели ПЖ.

Цель исследования – оценка комплекса показателей ПЖ у умерших работников ПО «Маяк» из регистра ОЛБ на основе данных многолетнего динамического наблюдения.

Материалы и методы

Исследование проведено в группе работников ПО «Маяк», входящих в Регистр ОЛБ, содержащий на 31 декабря 2020 г. первичные данные на 77 случаев: 75 случаев до 2007 г. [20] и 2 новых случая (военнослужащие) по мере получения дополнительных сведений были идентифицированы до 2020 г. [22]. Регистр включает медико-демографическую, дозиметрическую и профессиональную информацию, входящую в состав актуализированной базы данных (БД) «Радиационные аварии на ПО «Маяк» и медико-дозиметрической БД «Клиника» за весь период наблюдения [23].

В результате проведенной ретроспективной экспертизы из 77 «исторических» диагнозов ОЛБ была подтверждена у 54 (70,1%) работников. У 23 (29,9%) человек с зарегистрированной в прошлые годы ОЛБ легкой степени тяжести «исторический» диагноз не был подтвержден. Эти пациенты (18 человек) были определены как участники радиационных аварий. В 5 случаях провести экспертизу «исторического» диагноза было невозможно из-за недостатка данных. По состоянию на 31 декабря 2020 г. жизненный статус известен для 64 (83,1%) чело-

век; 13 (16,9%) человек выехали из г. Озерска, и их жизненный статус не известен. Из 64 человек с известным жизненным статусом 58 (90,6%) умерли, а 6 (9,4%) живы. В таблице 1 представлено распределение умерших работников регистра ОЛБ в зависимости от степени тяжести заболевания.

Поглощенными дозами внешнего облучения являлись верифицированные оценки доз острого облучения, полученные расчетным путем на основании показаний индивидуальных плеченных дозиметров работников и территориальных дозиметров, регистрирующих гамма-излучение в различных точках рабочих помещений [24]. Средние поглощенные дозы колебались от $1,06 \pm 0,35$ Гр у участников аварии до $64,75 \pm 50,59$ Гр при ОЛБ IV степени тяжести, мощность дозы – от $0,021 \pm 0,021$ до $0,466 \pm 0,490$ Гр с^{-1} соответственно.

Статистический анализ проводился с помощью программы STATISTICA 10 и включал следующие исследования:

- дескриптивный, ранговый корреляционный и регрессионный анализы, а также сравнение средних по критерию Стьюдента;

- непараметрические методы сравнения средних по U-критерию Манна – Уитни и по одностороннему точному критерию Фишера для сравнения частот в случае асимметричного распределения исследуемых показателей;

- оценка относительного риска – OR (relative risk) ухудшения показателей ПЖ с определением его значимости с помощью 95% доверительного интервала на основе четырехпольных таблиц для групп с разными дозами острого внешнего облучения и степенью тяжести ОЛБ [25].

В настоящем исследовании осуществлялся не только статичный подход, при котором проводилась непосредственная оценка ПЖ, фиксирующая число прожитых лет, в частности, ПЖ до острого облучения, ПЖ после острого облучения, общая ПЖ, как их сумма, но и потенциальные показатели: потерянные годы потенциальной жизни (ПГПЖ) – potential years of life lost (PYLL), то есть число лет, не дожитых до нормативного возрастного предела, называемого жизненным потенциалом, а также доля лиц, не доживших до определенного возраста, в частности, до критически низкого значения ПЖ (табл. 2) [14].

Потенциальные показатели ПЖ все шире и шире применяются в медицине [26, 27]. В связи с тем, что в когорте населения ожидаемая ПЖ всегда больше, чем в общей

Распределение умерших работников в зависимости от степени тяжести ОЛБ

Таблица 1

[Table 1]

Distribution of deceased workers by the acute radiation syndrome (ARS) severity

Степень тяжести ОЛБ [ARS severity]	Мужчины [Males]	Женщины [Females]	Все [Total]
Крайне тяжелая (IV) [Extreme]	6	1	7
Тяжелая (III) [Severe]	3	2	5
Средняя (II) [Moderate]	4	1	5
Легкая (I) [Light]	23	2	25
Всего ОЛБ [Total number of ARS]	36	6	42
Участники аварий [Accident participants]	14	2	16
Все [Total]	50	8	58

популяции, на 10–15 лет [28], для оценки ПГПЖ использовали повозрастные показатели ожидаемой ПЖ при рождении, полученные в когорте работников ПО «Маяк» 1948–1958 годов найма, а именно: до 77 лет у мужчин и до 81 года у женщин. ПГПЖ определяли как разницу между ожидаемой ПЖ в когорте и общей ПЖ. В 2018 г. ожидаемая ПЖ при рождении у городского населения РФ составила 68,1 лет у мужчин и 78,1 лет у женщин [29]. Неблагоприятной особенностью ожидаемой ПЖ при рождении у населения РФ является 10-летняя гендерная разница.

Результаты исследования и обсуждение

Как следует из таблицы 3, первое место в структуре причин смерти у мужчин занимают болезни системы кровообращения, второе – злокачественные новообразования, третье – внешние причины, в том числе ОЛБ, и в 1 случае – болезни органов пищеварения. У женщин преобладали злокачественные новообразования и болезни системы кровообращения. Смерть от ОЛБ тяжелой и крайне тяже-

лой степени тяжести, как у мужчин, так и у женщин, была основной причиной среди всех внешних причин.

Учитывая, что 90,6% членов регистра ОЛБ к настоящему времени умерли, в таблице 4 представлены результаты оценки ПЖ до острого облучения, ПЖ после острого облучения, общая ПЖ как их сумма, доля работников, не доживших до 35 лет, и ПГПЖ.

Из таблицы 4 видно, что статические показатели ПЖ при ОЛБ разной степени тяжести были статистически значимо ниже, за исключением ПЖ до острого облучения, а доля работников, не доживших до 35 лет, и ПГПЖ – статистически значимо выше у работников с ОЛБ тяжелой и особенно крайне тяжелой степени, чем при ОЛБ меньшей степени тяжести, а также у участников аварии без ОЛБ. Не установлено подобных изменений в зависимости от возраста найма на работу и возраста на момент острого облучения. Для сравнения отметим, что доля лиц, не доживших до 35 лет, в соответствующей по возрасту и полу группе лиц (24–34 лет) из когорты работников 1948–1958 годов найма составила всего 2,1%.

Показатели продолжительности жизни и их характеристика

Таблица 2

[Table 2]

Indicators of lifetime and their characteristics	
Показатели ПЖ, лет [Lifetime indicators, years]	Характеристика [Characteristic]
1. Статические: [1. Static:]	
ПЖ до острого внешнего облучения [Lifetime before acute external exposure]	ПЖ от даты рождения до даты острого внешнего облучения [Lifetime from date of birth to date of acute external exposure]
ПЖ после острого внешнего облучения [Lifetime after acute external exposure]	ПЖ от даты острого внешнего облучения до даты смерти [Lifetime from the date of acute external exposure to the date of death]
Общая ПЖ [Total lifetime]	ПЖ от даты рождения до даты смерти [Lifetime from date of birth to date of death]
2. Потенциальные: [2. Potential:]	
Потерянные годы потенциальной жизни (ПГПЖ) [potential years of life lost (PYLL)]	Число лет, не дожитых до ожидаемой ПЖ при рождении [Number of years short of expected life at birth]
Доля лиц, не доживших до критически низкого возраста [The proportion of people who did not live to a critically low age]	Доля лиц, не доживших до 35 лет [The proportion of people who did not live up to 35 years]

Структура причин смерти умерших работников регистра ОЛБ

Таблица 3

[Table 3]

Structure of causes of death of deceased workers included in the ARS registry						
Причины смерти [The causes of death]	Мужчины [Male]		Женщины [Female]		Все [Total]	
	n	%	n	%	n	%
Злокачественные новообразования [Malignant neoplasms]	11	22,0	3	37,5	14	24,1
Болезни системы кровообращения [Diseases of the circulatory system]	28	56,0	3	37,5	31	53,5
Болезни органов пищеварения [Diseases of the digestive system]	1	2,0	–	–	1	1,7
ОЛБ [The ARS]	7	14,0	1	12,5	8	13,8
Внешние причины [External causes]	3	6,0	1	12,5	4	6,9
Все [Total]	50	100,0	8	100,0	58	100,0

Показатели продолжительности жизни умерших работников из регистра ОЛБ

Таблица 4

[Table 4]

Lifetime indicators of deceased workers from the register of ARS

Степень тяжести ОЛБ [ARS severity]	Продолжительность жизни, лет [Lifetime, years]				
	До острого облучения [Before acute exposure]	После острого облучения [After acute exposure]	Общая [Total]	Общая менее 35 лет, % [Total less 35 years, %]	Потерянные годы потенциальной жизни [potential years of life lost]
Крайне тяжелая (IV) [Extreme]	27,8±3,80	0,04±0,030 ^a	27,84±3,83 ^a	85,7 ^b	49,8±4,48 ^a
Тяжелая (III) [Severe]	32,7±8,38	23,7±19,49 ^a	56,5±14,45 ^a	16,7	22,1±13,31 ^a
Средняя (II) [Moderate]	28,2±6,62	44,9±9,90	73,1±8,89	–	4,7±7,46
Легкая (I) [Light]	30,2±7,72	38,2±12,68	68,4±10,56	–	8,9±10,55
Участники аварий [accident participants]	30,9±6,76	43,0±14,68	73,8±14,68	6,3	3,7±14,54

Отмечены статистически значимые различия: а – (p < 0,05) по U-критерию Манна – Уитни относительно последующих групп: b – (p < 0,05) относительно группы ОЛБ III степени тяжести и участников аварий по одностороннему точному критерию Фишера. [Statistically significant differences were noted: a – (p < 0.05) according to the Mann-Whitney U-test relative to subsequent groups: b – (p < 0.05) relative to the of the acute radiation syndrome III severity and accident participants according to one-sided Fisher's exact test.]

В результате анализа структуры причин смерти, как следует из таблицы 5, при крайне тяжелой степени ОЛБ ведущей причиной являлось данное радиационное поражение, при тяжелой степени ОЛБ – злокачественные новообразования (60%) и радиационное поражение (20%). У работников с ОЛБ средней и легкой степени тяжести, а также у участников аварии структура причин смерти приближалась к общепопуляционным значениям [29].

При этом общая ПЖ умерших от злокачественных новообразований работников с ОЛБ III степени тяжести была статистически значимо меньше, чем в группе работников с ОЛБ I–II степенями тяжести и участников аварий без ОЛБ, умерших от злокачественных новообразований: 58,6±1,83 лет против 68,3±9,52 лет соответственно (t=3,29; p < 0,01 для 14 случаев). Распределение общей ПЖ при злокачественных новообразованиях во всей груп-

Структура причин смерти и общая ПЖ у работников с разной степенью тяжести ОЛБ

Таблица 5

[Table 5]

Structure of causes of death and total lifetime (LT) in workers by the ARS severity

Степень тяжести ОЛБ [ARS severity]	Злокачественные новообразования [Malignant neoplasms]			Болезни системы кровообращения [Diseases of the circulatory system]			ОЛБ [ARS]			Прочие [Others]			Все [Total]		
	n	%	ПЖ, лет [LT, years]	n	%	ПЖ, лет [LT, years]	n	%	ПЖ, лет [LT, years]	n	%	ПЖ, лет [LT, years]	n	%	ПЖ, лет [LT, years]
Крайне тяжелая (IV) [Extreme]	–	–	–	–	–	–	7	100,0	27,84±3,83	–	–	–	7	100,0	27,84±3,83a
Тяжелая (III) [Severe]	3	60,0	58,6±1,83c	1	20,0	73,0	1	20,0	33,0	–	–	–	5	100,0	56,5±14,45a
Средняя (II) [Moderate]	1	20,0	69,0	4	80,0	74,0±10,30	–	–	–	–	–	–	5	100,0	73,1±9,19
Легкая (I) [Light]	8	32,0	68,4±12,02	15	60,0	69,8±9,72	–	–	–	2	8,0	57,5±9,19	25	100,0	68,4±10,60
Участники аварий [accident participants]	2	12,5	67,0±1,41	11	68,8	77,4±12,14	–	–	–	3	18,8	65,3±14,95	16	100,0	73,8±14,76

c – (p < 0,01) относительно групп ОЛБ I–II степени тяжести и участников аварии по t-критерию; остальные обозначения те же, что и в таблице 4. [c – (p < 0.01) relative to ARS groups I–II severity and accident participants according to t-criterion; other designations are the same as in table 4.]

пе работников было нормальным и не имело расхождений между сравниваемыми группами, вследствие чего U-критерий Манна – Уитни оказался статистически незначимым. Следует отметить, что средний возраст смерти от злокачественных новообразований в РФ в 2018 г. достигал у мужчин 68,6 лет, а у женщин – 70,6 лет [30]. С учетом соотношения полов, в группе работников регистра ОЛБ средний возраст смерти от злокачественных новообразований составил бы в РФ 68,9 лет, что очень близко к возрасту смерти в группе работников с ОЛБ I–II степени тяжести и участников аварий без ОЛБ.

Для оценки связи радиационных факторов и показателей ПЖ были определены ранговые коэффициенты корреляции Спирмена. В таблице 6 представлены статистически значимые ранговые коэффициенты корреляции исследованных показателей, за исключением ПЖ до острого облучения, свидетельствующие о связи степени тяжести ОЛБ и дозы острого облучения с показателями ПЖ. Мощность дозы острого облучения не имела статистически значимой связи ни с одним из исследованных показателей ПЖ.

Таблица 6

Ранговые коэффициенты корреляции (R) радиационных факторов и показателей продолжительности жизни

[Table 6]

Rank correlation coefficients for radiation factors and life expectancy measures

Продолжительность жизни, лет [Lifetime, years]:	Степень тяжести ОЛБ [ARS severity]	Доза острого облучения, Гр [Acute exposure dose, Gy]
До острого облучения [Before acute exposure]	-0,04*	-0,05*
После острого облучения [After acute exposure]	-0,51	-0,33
Общая [Total]	-0,54	-0,35
Общая менее 35 лет, % [Total less 35 years, %]	-0,54	-0,51
Потерянные годы потенциальной жизни [potential years of life lost]	0,54	0,38

* – $p > 0,05$ [* – $p > 0,05$].

Следует отметить, что довольно высокая статистически значимая корреляционная связь между исследованными показателями ПЖ (коэффициенты ранговой корреляции, R от 0,6 до 0,8) является отражением разных сторон единого процесса сокращения ПЖ, обусловленного радиационным воздействием, а именно: сокращением ПЖ после острого облучения и общей ПЖ и повышением ПГПЖ, последние из которых характеризуют снижение жизненного потенциала индивида. Так, например, 50-летние мужчины во Франции в 1900 и 2000 гг. с точки зрения достигнутого возраста одинаковы, а с точки зрения жизненного потенциала нет. Действительно, ожидаемая ПЖ 50-летнего мужчины в 1900 г. составляла 19 лет, а в 2000 г. – 29 лет, то есть была на 10 лет больше [31]. Кроме того, 40-летний мужчина в ЕС-15 в 2005 г. имел такую же ожидаемую ПЖ, как 32-летний мужчина в 1960 г. В РФ и г. Озерске (место проживания работников ПО «Маяк») у 40-летних мужчин ожидаемая ПЖ, напротив,

соответствовала 48- и 46-летнему мужчине, то есть их жизненный потенциал был меньше [32].

На рисунке представлена динамика 3 показателей: ПЖ до острого облучения, ПЖ после острого облучения (вместе составляют общую ПЖ) и ПГПЖ. Из рисунка видно, что с повышением степени тяжести ОЛБ (рис. А) и натурального логарифма дозы острого облучения (рис. В) ПЖ до острого внешнего облучения не изменялась, то есть не имела связи с облучением, а ПЖ после острого облучения, напротив, сокращалась, в результате чего сокращалась общая ПЖ и в конечном счете повышались ПГПЖ. Таким образом, ведущий вклад в сокращение общей ПЖ в обоих случаях вносило сокращение ПЖ после острого внешнего облучения.

На дальнейшем этапе был проведен линейный регрессионный анализ зависимости 3 показателей ПЖ – ПЖ после острого облучения, общей ПЖ и ПГПЖ – от натурального логарифма (Ln) дозы острого внешнего облучения. В связи с небольшим числом случаев общей ПЖ менее 35 лет и их неравномерным распределением по дозовой шкале данный показатель не был включен в ре-

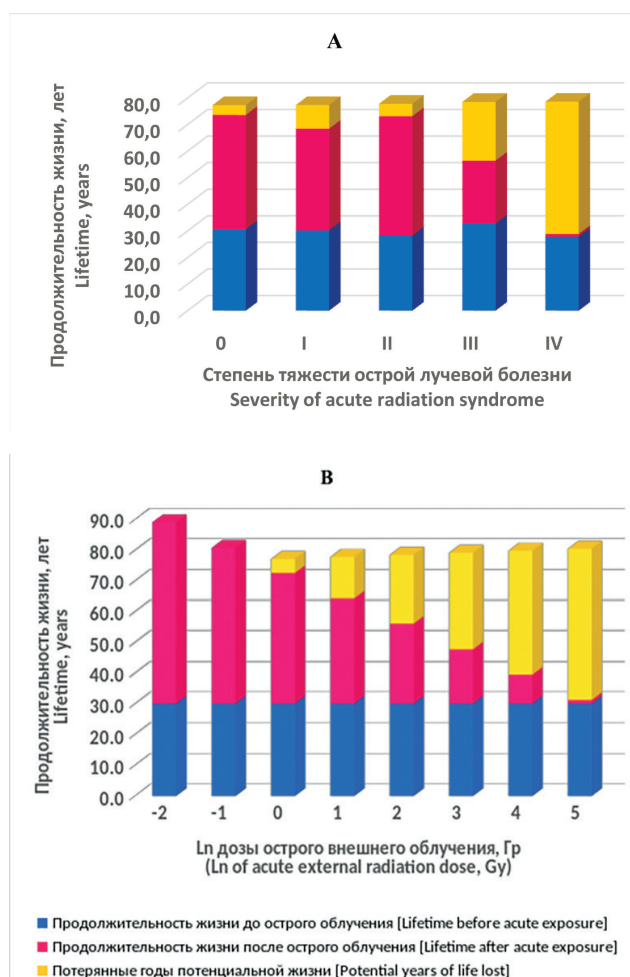


Рис. Динамика показателей ПЖ в зависимости от степени тяжести ОЛБ (А) и от натурального логарифма дозы острого внешнего облучения, Гр (В)

[Fig.] Lifetime measures dynamics in relation to acute radiation syndrome severity (А) and natural logarithm of the dose of acute external exposure, Gy (В)]

грессионный анализ. В результате анализа были получены статистически значимые уравнения регрессии, описывающие зависимость исследованных показателей ПЖ от Ln дозы острого облучения (табл. 7). Установлено, что на 1 Ln дозы ПЖ после острого облучения сокращалась на 8,3, общая ПЖ – на 8,8, а ПГПЖ, напротив, повышались на 8,4 лет. Отрицательные значения ПГПЖ свидетельствуют о том, что при низких дозах облучения общая ПЖ превышала ожидаемую ПЖ в когорте при рождении.

При оценке относительного риска повышения доли работников с общей ПЖ меньше 35 лет за референтный ОР, равный 1, принимали риск в группах с ОЛБ меньшей степени тяжести и участников аварий без ОЛБ, а также с меньшими дозами острого внешнего облучения. В результате было установлено, что данный показатель у работников при тяжелой и крайне тяжелой степени тяжести ОЛБ составил 26,8 относительно работников со средней и легкой степенью тяжести ОЛБ и участников аварий без ОЛБ (табл. 8). При подобном анализе в отношении дозы острого облучения показано, что у работников, подвергшихся облучению в поглощенных дозах более 10 Гр, относительный риск повышения доли работников с общей ПЖ

меньше 35 лет составил 18,8 относительно работников, подвергшихся меньшим дозам облучения.

Полученные величины относительного риска, характеризующие кратность его повышения относительно референтной группы, являются очень высокими, что обусловлено чрезвычайно сильным сокращением ПЖ при ОЛБ тяжелой и крайне тяжелой степени тяжести и дозах острого облучения более 10 Гр.

Следовательно, одновременный анализ нескольких показателей ПЖ, являющихся составными частями ожидаемой ПЖ при рождении в когорте, позволяет дать более объективную оценку сокращения ПЖ. При этом отсутствие связи с радиационным воздействием ПЖ до острого облучения исключает влияние на этот показатель других неизвестных случайных факторов, например, различий в возрасте найма на работу или на момент острого облучения. Выявленное в исследовании снижение ПЖ после острого облучения свидетельствует о том, что именно это обстоятельство является основной причиной сокращения общей ПЖ. Повышение ПГПЖ и доли лиц, не доживших до 35 лет, является отражением снижения жизненного потенциала у работников ПО «Маяк» после ОЛБ.

Оценка зависимости показателей продолжительности жизни от натурального логарифма дозы острого внешнего облучения

Таблица 7

[Table 7]

Association of lifetime measures with a natural log of acute exposure dose]

Продолжительность жизни, лет [Lifetime, years]	Уравнения регрессии [Regression equations]	F*	p-value
После острого облучения [After acute exposure]	$= (42,62 \pm 2,91) - (8,28 \pm 1,71) \times \text{Ln дозы, Гр} [= (42,62 \pm 2,91) - (8,28 \pm 1,71) \times \text{Ln doses, Gy}]$	23,4	<0,00002
Общая [Total]	$= (72,88 \pm 2,70) - (8,75 \pm 1,59) \times \text{Ln дозы, Гр} [= (72,88 \pm 2,70) - (8,75 \pm 1,59) \times \text{Ln doses, Gy}]$	30,3	<0,000001
Потерянные годы потенциальной жизни [potential years of life lost]	$= (6,64 \pm 2,37) + (8,41 \pm 1,39) \times \text{Ln дозы, Гр} [= (6,64 \pm 2,37) + (8,41 \pm 1,39) \times \text{Ln doses, Gy}]$	36,8	<0,000001

* – критерий Фишера [* – Fisher's test].

Таблица 8

Относительный риск (ОР) повышения доли лиц с общей ПЖ менее 35 лет у работников с разной степенью тяжести ОЛБ и дозой острого внешнего облучения

[Table 8]

Relative risk (RR) of increase of the ratio of individuals with total lifetime less than 35 years among workers with various severity degrees of ARS and dose of acute external exposure]

Группы [Groups]	Общая продолжительность жизни, лет [Total lifetime, years]			ОР* [RR]	95% ДИ [95% CI]	
	< 35	≥ 35	Все [Total]		min	max
По степени тяжести ОЛБ [By ARS severity]						
I–II+участники аварии [I–II+ accident participants]	1	45	46	1,00	Референтный [Reference]	
III–IV	7	5	12	26,8	3,8	191,1
По дозам острого внешнего облучения, Гр [By acute radiation doses, Gy]						
>10	2	48	50	1,00	Референтный [Reference]	
≤10	6	2	8	18,8	2,7	129,8

* – жирным шрифтом отмечены статистически значимые ОР: $p < 0,001$ [* – statistically significant RRs ($p < 0.001$) are marked in bold].

Динамика соотношения этих показателей, за исключением доли лиц, не доживших до 35 лет, отчетливо видна на рисунке.

Заключение

Таким образом, в группе работников ПО «Маяк» с ОЛБ, подвергшихся в результате аварийных ситуаций острому внешнему облучению в значительных дозах, впервые проведена оценка ПЖ. Необходимыми условиями для выполнения настоящего исследования явились: наличие регистра ОЛБ и практически полная аварийная и естественная убыль работников, достигшая 90,6%.

В результате проведенного исследования установлено статистически значимое сокращение ПЖ после острого облучения и общей ПЖ и статистически значимое повышение доли лиц с общей ПЖ менее 35 лет и ПГПЖ у работников с ОЛБ тяжелой и особенно крайне тяжелой степени относительно работников с ОЛБ средней и легкой степени тяжести, а также участников аварий без ОЛБ. При этом причиной сокращения ПЖ при ОЛБ IV степени тяжести было крайне тяжелое течение заболевания вследствие облучения в очень высоких дозах. При ОЛБ III степени тяжести сокращение ПЖ было обусловлено, главным образом, преждевременной смертностью (в более раннем возрасте) от злокачественных новообразований, а также неблагоприятного течения ОЛБ. У работников с ОЛБ I и II степени тяжести, а также у участников аварий без ОЛБ структура причин смерти приближалась к общепопуляционным значениям.

С помощью регрессионного анализа проведена оценка зависимости показателей ПЖ от натурального логарифма дозы острого внешнего облучения у работников с ОЛБ. Установлена статистически значимая линейная зависимость ПЖ после острого облучения и общей ПЖ, а также ПГПЖ от дозы острого облучения. На 1 Lp дозы облучения ПЖ после острого облучения и общая ПЖ сокращались на 8,3 и 8,8 лет соответственно, а ПГПЖ повышались на 8,4 лет.

Относительный риск повышения доли работников с общей ПЖ менее 35 лет у работников с ОЛБ тяжелой и крайне тяжелой степенями тяжести по сравнению с работниками легкой и средней степенями тяжести ОЛБ был чрезвычайно высоким и составил 26,8. Относительный риск повышения доли работников с общей ПЖ менее 35 лет у работников с дозами острого облучения более 10 Гр относительно работников с дозами острого облучения менее 10 Гр был несколько меньше и составил 18,8. Такие высокие значения риска, очевидно, обусловлены чрезвычайно неблагоприятным воздействием острого облучения в высоких дозах на жизненный потенциал человека, который в конечном счете определяет предстоящую ПЖ в разные возрастные периоды.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Тельнов В.И. – существенный вклад в разработку концепции исследования, анализ и интерпретация данных, анализ литературы, написание текста статьи.

Азизова Т.В. – существенный вклад в разработку дизайна исследования, анализ данных, редактирование статьи и утверждение окончательного варианта статьи для публикации.

Мосеева М.Б. – сбор и обработка данных регистра острой лучевой болезни, подготовка таблиц.

Банникова М.В. – поиск литературы, группировка данных и подготовка иллюстраций.

Авторы согласны нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой части работы.

Благодарности

Авторы выражают благодарность коллективу отдела радиационной безопасности и дозиметрии ФГБУН ЮУриБФ ФМБА России за предоставление доступа к базе данных ДСРМ-2013, созданной в рамках российско-американского сотрудничества. Авторы благодарны рецензентам за конструктивные замечания и предложения, которые позволили улучшить качество статьи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального медико-биологического агентства России в рамках контракта от 28.06.2021 г. №11.315.21.2 «Совершенствование системы аварийного реагирования при чрезвычайных радиационных ситуациях и радиационных авариях» (шифр «Авария-21»).

Литература

1. Голубев А.Г. Естественная история продолжительности жизни и старения. 3-е издание, переработанное и дополненное. СПб: Эко-Вектор, 2021. 551 с.
2. Маликов Н.С. Продолжительность жизни как интегрирующий показатель ее качества // Уровень жизни населения регионов России. 2010. № 2(144). С. 37–44.
3. Кузнецова П. Курение как фактор сокращения ожидаемой продолжительности жизни в России // Демографическое обозрение. 2019. Т. 6, № 3. С. 31–57.
4. Борисова К.Б., Дворецкий Л.М., Федотов А.А. Ожидаемая продолжительность жизни в России: региональный разрез и воздействующие факторы // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2021. № 10-1(61). С. 203–320. DOI:10.24412/2500-1000-2021-10-1-203-209.
5. Ярмоненко С.П., Вайнсон А.А. Радиобиология человека и животных: учебное пособие. М.: Высшая школа, 2004. 549 с.
6. Калистратова В.С., Беляев И.К., Жорова Е.С., и др. Радиобиология инкорпорированных радионуклидов. Под ред. В.С. Калистратовой. Изд. 2-е. М.: ФГБУ ГНЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2016. 556 с.
7. Hauptmann M., Mohan A.K., Doody M.M., et al. Mortality from diseases of the circulatory system in radiologic technologists in the United States // American Journal of Epidemiology. 2003. Vol. 157, № 3. P. 239–248. DOI:10.1093/aje/kwf189.
8. Berrington A., Darby S.C., Weiss H.A., Doll R. 100 years of observation on British radiologists: mortality from cancer and other causes 1897–1997 // British Journal of Radiology. 2001. Vol. 74, № 882. P. 507–519. DOI:10.1259/bjr.74.882.740507.
9. Cologne J.B., Preston D.L. Longevity of atomic-bomb survivors // Lancet. 2000. Vol. 356, № 9226. P. 303–311. DOI:10.1016/S0140-6736(00)02506-X.
10. Vrijheid M., Cardis E., Ashmore P., et al. Mortality from diseases other than cancer following low doses of ionizing radiation: results from the 15-Country Study of nuclear

- industry workers // *International Journal Epidemiology*. 2007. Vol. 36, № 5. P. 1126–1135. DOI:10.1093/ije/dym138.
11. Polednak A.P., Stehney A.F., Rowland R.E. Mortality among women first employed before 1930 in the U.S. radium dial-painting industry. A group ascertained from employment lists // *American Journal of Epidemiology*. 1978. Vol. 107, № 3. P. 179–195. DOI:10.1093/oxfordjournals.aje.a112524.
12. Spiess H. Life-span study on late effects of ^{224}Ra in children and adults // *Health Physics*. 2010. Vol. 99, № 3. P. 286–291. DOI:10.1097/HP.0b013e3181cb857f.
13. Тельнов В.И., Третьяков Ф.Д., Окотенко П.В. Инкорпорация плутония-239 и сокращение продолжительности жизни у работников ПО «Маяк» при опухолевых и неопухолевых причинах смерти // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2017. Т. 62, № 2. С. 28–34.
14. Тельнов В.И., Лёгких И.В., Окотенко П.В. Анализ зависимости показателей продолжительности жизни от инкорпорации плутония-239 у работников атомной промышленности при опухолевых и неопухолевых причинах смерти // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2021. Т. 66, № 6. С. 57–62. DOI:10.12737/1024-6177-2021-66-6-57-62.
15. Тельнов В.И. Сокращение продолжительности здоровой жизни до диагностики злокачественных новообразований у работников ПО «Маяк» при инкорпорации ^{239}Pu // *Вопросы радиационной безопасности*. 2021. № 2. С. 61–69.
16. Гуськова А.К., Байсоголов Г.Д. Лучевая болезнь человека. М.: Медицина, 1971. 382 с.
17. Gusev G., Guskova A.K., Mettler F.A., et al. Medical Management of Radiation Accidents. London, New York, Washington DC: CRS Press, 2001. 640 p.
18. Ильин Л.А., Соловьев В.Ю. Непосредственные медицинские последствия радиационных инцидентов на территории бывшего СССР // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2004. Т. 49, № 6. С. 37–48.
19. McLaughlin T.P., Monahan S.P., Pruvost N.L., et al. A Review of Criticality Accidents. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 2000. P. 9–13.
20. Азизова Т.В., Сумина М.В., Семенихина Н.Г. и др. Регистр острой лучевой болезни // *Вопросы радиационной безопасности*. 2007. № 3. С. 78–83.
21. Азизова Т.В., Мосеева М.Б., Осовец С.В., Сумина М.В. Регистр острой лучевой болезни, зарегистрированной у работников предприятия атомной промышленности «Маяк» // *Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях*. 2011. № 4. С. 14–19.
22. Азизова Т.В., Тельнов В.И., Мосеева М.Б. Острая лучевая болезнь в когорте работников, подвергшихся профессиональному облучению // XXII всероссийская научно-практическая конференция «Дни науки – 2022». Посвящается 80-летию НИЯУ МИФИ и 70-летию ОТИ НИЯУ МИФИ: Материалы конференции. Озёрск, 20–23 апреля 2022 г. Озёрск: ОТИ НИЯУ МИФИ, 2022. С. 44–48.
23. Азизова Т.В., Тепляков И.И., Григорьева Е.С., и др. Медико-дозиметрическая база данных «Клиника» работников ПО «Маяк» и их семей // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2009. Т. 54, № 5. С. 26–35.
24. Василенко Е.К., Сметанин М.Ю., Александрова О.Н., и др. Верификация индивидуальных доз внешнего облучения работников ПО «Маяк» (методы и результаты) // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2001. Т. 46, № 6. С. 37–57.
25. Гринхальх Т. Основы доказательной медицины: пер. с англ. 5-е изд., перераб. и доп. М.: ГЕОТАР-МЕД, 2022. 328 с.
26. Сачек М.М., Писарик В.М., Новик И.И., Малахова И.В. Потерянные годы потенциальной жизни – один из инструментов оценки потерь здоровья населения // *Вопросы организации и информатизации здравоохранения*. 2018. № 1(94). С. 44–52.
27. Самородская И.В., Семенов В.Ю. Потерянные годы потенциальной жизни от болезней системы кровообращения экономически активного населения Российской Федерации в 2013–2019 годах // *Российский кардиологический журнал*. 2021. Т. 26, № 5. С. 82–87. DOI:10.15829/1560-4071-2021-4161.
28. Ediev D.M. Life expectancy in developed countries is higher than conventionally estimated. Implication from improved measurement of human longevity // *European Demographic Research Papers*. 2010. № 1. P. 1–35.
29. Демографический ежегодник России. 2019: Статистический сборник. М.: Росстат, 2019. 252 с.
30. Демографический ежегодник России 2019. Приложение к Демографическому ежегоднику России 2019. Смертность по причинам смерти. URL: https://www.gks.ru/bgd/regl/B19_16/lssWWW.exe/Stg/pril6.xls (Дата обращения: 30.01.2023).
31. Human Mortality Database. URL: <http://www.mortality.org> (Дата обращения: 30.01.2023).
32. Тельнов В.И. Повышение продолжительности жизни как демографическая парадигма социально-экономического развития России // *Горизонты демографического развития России: смена парадигм научного предвидения: сборник материалов IV Уральского демографического форума с международным участием. Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2013. С. 393–398.*

Поступила: 04.01.2023 г.

Тельнов Виталий Иванович – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник (звание), ведущий научный сотрудник клинического отдела Южно-Уральского института биофизики Федерального медико-биологического агентства России, Озёрск, Россия

ORCID® <https://orcid.org/0000-0003-3509-5372>

Азизова Тамара Васильевна – кандидат медицинских наук, главный научный сотрудник, заместитель директора по науке, заведующая клиническим отделом Южно-Уральского института биофизики Федерального медико-биологического агентства России. **Адрес для переписки:** 456783, Россия, г. Озёрск, Челябинская область, Озёрское шоссе, д. 19; E-mail: clinic@subi.su

ORCID® <https://orcid.org/0000-0001-6954-2674>

Мосеева Мария Борисовна – научный сотрудник клинического отдела Южно-Уральского института биофизики Федерального медико-биологического агентства России, Озёрск, Россия

ORCID® <https://orcid.org/0000-0003-3741-6600>

Банникова Мария Владимировна – научный сотрудник клинического отдела Южно-Уральского института биофизики Федерального медико-биологического агентства России, Озёрск, Россия

ORCID® <https://orcid.org/0000-0002-2755-6282>

Для цитирования: Тельнов В.И., Азизова Т.В., Мосеева М.Б., Банникова М.В. Продолжительность жизни у работников ПО «Маяк» после острой лучевой болезни разной степени тяжести // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 1. С. 80-90. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-80-90

Lifetime of Mayak workers after acute radiation syndrome of various severity levels

Vitaly I. Telnov, Tamara V. Azizova, Maria B. Moseeva, Maria V. Bannikova

Southern Urals Biophysics Institute, Ozyorsk, Chelyabinsk region, Russia

Assessment of the impact of radiation exposure on human lifetime is an actual problem in radiation medicine. The aim of the study was to assess lifetime in Mayak PA workers who had developed acute radiation syndrome following accidental acute high-dose external exposure and in those individuals who had taken part in nuclear accidents but had not developed the syndrome. Study analyses considered 58 deceased Mayak PA workers (50 males and 8 females) and were performed using STATISTICA 10 software. Five indicators of lifetime were studied: static – before and after acute exposure, total lifetime, as well as potential – potential years of life lost and the proportion of people who lived less than 35 years. The study demonstrated significant decrease in static indicators excluding lifetime before acute exposure and increase in potential indicators of lifetime in workers with severe and especially with extreme acute radiation syndrome compared to workers with moderate and modest acute radiation syndrome and to workers free of the syndrome. The reason for the decrease of lifetime in workers with extreme acute radiation syndrome was extremely severe course of the disease. Decrease of lifetime in cases with severe level of the syndrome was mainly due to early death from malignancies. A significant linear regression association with natural logarithm of acute radiation dose in Gy was observed for lifetime indicators. At 1 logarithm of the radiation dose, the lifetime after acute exposure was reduced by 8.3 years, total lifetime by 8.8 years, and potential years of life lost increased by 8.4 years. The relative risk of the increase of the proportion of workers with less than 35 years of life was considerably higher in workers with extreme and severe acute radiation syndrome and in workers with acute radiation doses above 10 Gy compared to other groups of workers: 26.8 and 18.8 (95% CI: 3.8–191.1 and 2.7–129.8; $p < 0.001$), respectively. Thus, for the first time, a reduction in lifetime after acute radiation syndrome was found among Mayak PA workers.

Key words: Mayak workers, acute external exposure to ionizing radiation, acute radiation syndrome, causes of death, lifetime, regression analysis, relative risk

Information about the personal contribution of the authors to the work on the article

Vitaly I. Telnov – a significant contribution to the development of the research concept, analysis and interpretation of data, literature analysis, writing the text of the article.

Tamara V. Azizova – significant contribution to the development of study design, data analysis, editing of the article and approval of the final version of the article for publication.

Maria B. Moseeva – collection and processing of data from the register of acute radiation sickness, preparation of tables.

Maria V. Bannikova – literature search, grouping of data and preparation of illustrations.

The authors agree to be responsible for all aspects of the article, ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy or integrity of any part of the work.

Acknowledgements

The authors would like to thank the employees of the SUBI's department of radiation safety and dosimetry for providing access to the MWDS-2013 database created within the framework of the Russian-American cooperation. The authors are also grateful to the reviewers for constructive comments and suggestions that have significantly improved the quality of the manuscript.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Tamara V. Azizova

Southern Urals Biophysics Institute

Address for correspondence: Ozyorskoe shosse, 19, Ozyorsk, Chelyabinsk Region, Russia, 456783; E-mail: clinic@subi.su

Funding

The work was financially supported by the Federal Medical and Biological Agency under contract No. 11.315.21.2 dated June 28, 2021 "Improving the emergency response system in emergency radiation situations and radiation accidents" (code "Avariya-21").

References

1. Golubev AG. The natural history of lifespan and aging. 3rd ed., revised and enlarged. St. Petersburg: Eco-Vector; 2021. 551 p. (In Russian).
2. Malikov NS. Life expectancy as an integrating indicator of its quality. *Uroven zhizni naseleniya regionov Rossii = Living standards of the population of regions of Russia*. 2010;2(144): 37–44 (In Russian).
3. Kuznecova P. Smoking as a factor in reducing life expectancy in Russia. *Demograficheskoye obozreniye = Demographic Review*. 2019;6(3): 31–57 (In Russian).
4. Borisova KB, Dvoretzky LM, Fedotov AA. Life expectancy in Russia: regional profile and influencing factors. *Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i yestestvennykh nauk = International Journal of the Humanities and Natural Sciences*. 2021;10-1(61): 203–320. DOI:10.24412/2500-1000-2021-10-1-203-209. (In Russian).
5. Jarmonenko SP, Vainson AA. Radiobiology of man and animals: textbook. Moscow: Higher school; 2004. 549 p. (In Russian).
6. Kalistratova VS, Belyaev IK, Zhorova ES, Parfenova IM, Tishchenko GS. Radiobiology of incorporated radionuclides / Ed. V.S. Kalistratova. Ed. 2nd. M.: A. I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center of the FMBA of Russia; 2016. 556 p. (In Russian).
7. Hauptmann M, Mohan AK, Doody MM, Linet MS, Mabuchi K. Mortality from diseases of the circulatory system in radiologic technologists in the United States. *American Journal of Epidemiology*. 2003;157(3): 239–248. DOI:10.1093/aje/kwf189.
8. Berrington A, Darby SC, Weiss HA, Doll R. 100 years of observation on British radiologists: mortality from cancer and other causes 1897–1997. *British Journal of Radiology*. 2001;74(882): 507–519. DOI:10.1259/bjr.74.882.740507.
9. Cologne JB, Preston DL. Longevity of atomic-bomb survivors. *Lancet*. 2000;356(9226): 303–311. DOI:10.1016/S0140-6736(00)02506-X.
10. Vrijheid M, Cardis E, Ashmore P, Auvinen A, Bae J-M., Engels H, et al. Mortality from diseases other than cancer following low doses of ionizing radiation: results from the 15-Country Study of nuclear industry workers. *International Journal of Epidemiology*. 2007;36(5): 1126–1135. DOI:10.1093/ije/dym138.
11. Polednak AP, Stehney AF, Rowland RE. Mortality among women first employed before 1930 in the U.S. radium dial-painting industry. A group ascertained from employment lists. *American Journal of Epidemiology*. 1978;107(3): 179–195. DOI:10.1093/oxfordjournals.aje.a112524.
12. Spiess H. Life-span study on late effects of 224Ra in children and adults. *Health Physics*. 2010;99(3): 286–291. DOI:10.1097/HP.0b013e3181cb857f.
13. Telnov VI, Tretyakov FD, Okatenko PV. Incorporation of plutonium-239 and reduction of life time among Mayak employees with tumor and non-tumor causes of death. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost' = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2017;62(2): 28–34 (In Russian).
14. Telnov VI, Legkikh IV, Okatenko PV. Analysis of the dependence of life time indicators on the incorporation of plutonium-239 in nuclear industry workers with tumor and non-tumor causes of death. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost' = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2021;66(6): 57–62. DOI:10.12737/1024-6177-2021-66-6-57-62 (In Russian).
15. Telnov VI. Reducing the duration of healthy life before the diagnosis of malignant neoplasms in employees of the Mayak Production Association with the incorporation of 239Pu. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Radiation Safety Problems*. 2021;2: 61–69 (In Russian).
16. Guskova AK, Baysogolov GD. Radiation sickness in humans. Moscow: Medicine; 1971. 382 p. (In Russian).
17. Gusev G, Guskova AK, Mettler FA, et al. Medical Management of Radiation Accidents. London, New York, Washington DC: CRS Press; 2001. 640 p.
18. Ilyin LA, Solov'yev VYu. Immediate medical consequences of radiation incidents on the territory of the former USSR. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost' = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2004;49(6): 37–48 (In Russian).
19. McLaughlin TP, Monahan SP, Pruvost NL, Frolov VV, Ryazanov BG, Sviridov VI. A Review of Criticality Accidents. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory; 2000. P. 9–13.
20. Azizova TV, Sumina MV, Semeniagina NG, Druzhinina MB, Grigoryeva ES, Stecenko LA, et al. Register of acute radiation sickness. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Radiation Safety Problems*. 2007;3: 78–83. (In Russian).
21. Azizova TV, Moseeva MB, Osovets SV, Sumina MV. Register of acute radiation sickness registered among employees of the nuclear industry enterprise "Mayak". *Mediko-biologicheskiye i sotsial'no-psikhologicheskiye problemy bezopasnosti v chrezvychaynykh situatsiyakh = Medico-biological and socio-psychological problems of safety in emergency situations*. 2011;4: 14–19. (In Russian).
22. Azizova TV, Telnov VI, Moseeva MB. Acute radiation sickness in a cohort of workers exposed to occupational exposure. XXII All-Russian Scientific and Practical Conference "Days of Science – 2022". Dedicated to the 80th anniversary of NRNU MEPhI and the 70th anniversary of OTI NRNU MEPhI: Proceedings of the conference. Ozersk, April 20–23, 2022 Ozersk: OTI NRNU MEPhI; 2022. P. 44–48. (In Russian).
23. Azizova TV, Teplyakov II, Grigorieva ES. Medical and dosimetric database "Clinic" of employees of the Mayak Production Association and their families. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost' = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2009;54(5): 26–35. (In Russian).
24. Vasilenko EK, Smetanin MYu, Aleksandrova ON, et al. Verification of individual doses of external exposure of Mayak workers (methods and results). *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost' = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2001;46(6): 37–57. (In Russian).
25. Greenhalch T. Fundamentals of evidence-based medicine: Per. from English. 5th ed., revised. and additional. Moscow: GEOTAR-MED; 2022. 328 p. (In Russian).
26. Sachek MM, Pisarik VM, Novik II, Malahova IV. Potential years of life lost – one of the tools for assessing the loss of public health. *Voprosy organizatsii i informatizatsii zdavookhraneniya = Problems of organization and informatization of healthcare*. 2018;1(94): 44–52. (In Russian).
27. Samorodskaya IV, Semenov VYu. Potential years of life lost from diseases of the circulatory system of the economically active population of the Russian Federation in 2013–2019. *Rossiyskiy kardiologicheskii zhurnal = Russian Journal of Cardiology*. 2021;26(5): 82–87. DOI:10.15829/1560-4071-2021-4161. (In Russian).
28. Ediev DM. Life expectancy in developed countries is higher than conventionally estimated. Implication from improved measurement of human longevity. *European Demographic Research Papers*. 2010;1: 1–35.
29. Demographic Yearbook of Russia. 2019: Statistical collection. Moscow: Russtat; 2019. 252 p. (In Russian).
30. Demographic Yearbook of Russia 2019. Appendix to the Demographic Yearbook of Russia 2019. Mortality by cause

of death. Available from: https://www.gks.ru/bgd/regl/B19_16/lssWWW.exe/Stg/pril6.xls [Accessed 30 January 2023].

31. Human Mortality Database. Available from: <http://www.mortality.org> [Accessed 30 January 2023].
32. Telnov V.I. Increasing life expectancy as a demographic paradigm of the socio-economic development of Russia.

Horizons of the demographic development of Russia: changing paradigms of scientific foresight: a collection of materials from the IV Ural Demographic Forum with international participation. Yekaterinburg: Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2013. P. 393–398. (In Russian).

Received: January 04, 2023

Vitaly I. Telnov – Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher, Leading Researcher of the Clinical Department of the Southern Urals Biophysics Institute, Ozyorsk, Russia

ORCID[®] <https://orcid.org/0000-0003-3509-5372>

For correspondence: Tamara V. Azizova – Candidate of Medical Sciences, Principal Research Associate, Deputy Director for Science, Head of the Clinical Department of the Southern Urals Biophysics Institute (Ozyorskoe shosse, 19, Ozyorsk, Chelyabinsk Region, Russia, 456783; E-mail: clinic@subi.su)

ORCID[®] <https://orcid.org/0000-0001-6954-2674>

Maria B. Moseeva – Researcher, Clinical Department, Southern Urals Biophysics Institute, Ozyorsk, Russia

ORCID[®] <https://orcid.org/0000-0003-3741-6600>

Maria V. Bannikova – Researcher, Clinical Department, Southern Urals Biophysics Institute, Ozyorsk, Russia

ORCID[®] <https://orcid.org/0000-0002-2755-6282>

For citation: Telnov V.I., Azizova T.V., Moseeva M.B., Bannikova M.V. Lifetime of Mayak workers after acute radiation syndrome of various severity levels. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 1. P. 80-90. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-80-90

Риск онкологических заболеваний репродуктивных органов у женщин Уральской когорты аварийно-облученного населения: 1956–2019

Л.Ю. Крестинина, С.С. Силкин

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

Целью работы является получение прямых оценок избыточного относительного риска заболеваний злокачественными новообразованиями репродуктивных органов у женщин Уральской когорты аварийно-облученного населения при хроническом облучении в диапазоне доз, не превышающих 1. Материалы и методы: численность аналитической когорты женщин Уральской когорты аварийно-облученного населения составила 26 076 человек, период наблюдения — 65 лет (с 1956 по 2019 г.), а число человеко-лет под риском — 749 053. Территория наблюдения за онкологической заболеваемостью ограничена 5 районами Челябинской области, г. Челябинском и г. Озёрском. За 65 лет на территории наблюдения за заболеваемостью зарегистрирован 601 случай злокачественных новообразований женских репродуктивных органов. Средняя кумулятивная доза на матку для женщин аналитической когорты составила 42 мГр, максимальная — 988 мГр. В исследовании применён регрессионный анализ с использованием простой параметрической модели избыточного относительного риска. Значимость результатов оценивалась методом максимального правдоподобия с 95% вероятностью. Анализ проведён с использованием статистического пакета «Epicure». Результаты: анализ риска выявил статистически значимую линейную зависимость избыточного относительного риска заболеваний злокачественными новообразованиями шейки матки и суммарно всех репродуктивных органов от дозы, накопленной в стенках матки. В работе оценено влияние модифицирующих факторов, доступных для анализа, на величину риска. Не выявлена зависимость риска заболеваний злокачественными новообразованиями тела матки от дозы на матку и яичников от дозы на яичник. Возможность получения значимых величин риска развития злокачественных новообразований отдельных органов и систем появилась с увеличением численности анализируемой популяции в результате объединения лиц, облучённых на Южном Урале в 2 радиационных авариях, в 1 когорту, что увеличило статистическую силу исследования. Оценка избыточного относительного риска злокачественных новообразований репродуктивных органов в данной когорте проведена впервые. Данная когорта обладает большим потенциалом для дальнейших исследований с целью получения прямых оценок радиационного риска онкологических и неонкологических заболеваний в результате хронического облучения в диапазоне доз до 1 Гр.

Ключевые слова: Уральская когорта аварийно-облученного населения (УКАОН), избыточный относительный риск, репродуктивные органы, рак шейки матки, облучённое население.

Введение

В 1950–1960-е гг. на Южном Урале произошли две крупные радиационные аварии, связанные с деятельностью ПО «Маяк». Первая обусловлена загрязнением реки Течи в результате сброса жидких радиоактивных отходов, пик которых пришёлся на 1951 г., вторая — взрыв в хранилище жидких радиоактивных отходов на территории ПО «Маяк» в конце сентября 1957 г., в результате которого образовался Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС). Радиоактивное загрязнение реки Течи и населённых пунктов (НП) на ВУРСе привели к хроническому облучению населения, проживающего на загрязнённых территориях, в диапазоне доз до 1 Гр

[1–3]. Изучение отдалённых эффектов на здоровье при хроническом облучении населения является весьма актуальной задачей в связи с неоднозначными результатами проводившихся исследований и сложностью механизмов развития ответной реакции организма на облучение на разных уровнях (от популяционного до генетического).

С 1950-х гг. в Уральском научно-практическом центре радиационной медицины (УНПЦ РМ) ведётся активное наблюдение за облучённым населением. С целью изучения эффектов ионизирующего излучения на здоровье населения в центре поэтапно были созданы регистры населения, облученного в НП на реке Тече и в НП на территории ВУРСа, и сформированы 2 когорты — когорта реки Течи

Крестинина Людмила Юрьевна

Уральский научно-практический центр радиационной медицины

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

(КРТ) и когорты ВУРСа (КВУРС). Разработка в УНПЦ РМ единых методов наблюдения и единой дозиметрической системы для расчёта индивидуальных доз способствовали объединению населения, облученного на Южном Урале в 2 радиационных авариях, и созданию Уральской когорты аварийно-облученного населения (УКАОН) [4]. Увеличение численности когорты и, как следствие, статистической силы исследования, повысили вероятность получения значимых оценок избыточного относительного риска (ИОР) для органоспецифических злокачественных новообразований (ЗНО), в частности, ЗНО женских репродуктивных органов, анализируемых в данной статье.

ЗНО женских репродуктивных органов занимают одно из лидирующих мест в структуре онкологической заболеваемости как в России, так и в мире [5]. Самыми распространёнными локализациями являются шейка матки (ШМ), тело матки (ТМ), яичник. Основными факторами риска развития ЗНО шейки матки являются хронические воспалительные процессы (цервицит), генитальные инфекции (папилломавирусная инфекция), ранние беременность и роды, разрывы и травмы шейки в процессе родов, наследственная предрасположенность и курение [6]. Для возникновения и развития ЗНО тела матки основную роль играют нарушения менструального цикла, ранняя менархе, гормональные дисфункции, бесплодие, гиперплазия эндометрия, возраст, ожирение и диабет [6, 7]. В качестве основных факторов риска развития ЗНО яичников выделяют возраст, поздние первые роды (после 35 лет), нарушения менструального цикла, поздний климакс (старше 55 лет), воспалительные процессы яичника (сальпингоофориты), кисты и эндометриоз [5–7].

Воздействие ионизирующего излучения является фактором риска для возникновения и развития ЗНО большинства локализаций, в том числе и женских репродуктивных органов [8].

Цель исследования – получение прямых оценок радиогенного риска заболеваний ЗНО женских репродуктивных органов в УКАОН за период с 1956 по 2019 г.

Материалы и методы

Описание когорты

Доступ к данным об онкологической заболеваемости ограничен периодом и территорией наблюдения. Начало наблюдения ограничено 1956 г., когда появилась официальная регистрация всех онкозаболеваний в Челябинской области. Сбор информации о ЗНО до появления электронных регистров на постоянной основе проводился исследователями на территории 5 районов Челябинской области (Каслинский, Кунашакский, Красноармейский, Аргаяшский и Сосновский), по которым протекала река Теча и которые включали территорию ВУРСа, а также г. Челябинска и г. Озерска (города основной миграции населения из сельских районов). Эта территория определена как территория наблюдения за заболеваемостью (ТНЗ). В связи с этим при формировании аналитической субкогорты из общего числа женщин УКАОН были исключены 1694 женщины, умершие, мигрировавшие или заболевшие до 01.01.1956 г., а также 7162 женщины, не проживавшие на ТНЗ в течение всего периода наблюдения с 01.01.1956 г. по 31.12.2019 г. (большую часть которых составили женщины, облучённые в прибрежных сёлах реки Течи в Курганской области).

В итоге численность аналитической субкогорты для анализа радиогенного риска заболеваний ЗНО женских репродуктивных органов составила 26 076 человек.

В таблице 1 представлены демографические характеристики женской субкогорты УКАОН. Как и все население Южного Урала, женщины субкогорты представлены

Демографические характеристики женской субкогорты за 1956–2019 гг.

Таблица 1

[Table 1]

Demographic characteristics of the female subcohort for 1956–2019]

Категории [Categories]	Русские [Russians]		Татары и башкиры [Tatars and Bashkirs]		Всего [Total]	
	Человек [Persons]	%	Человек [Persons]	%	Человек [Persons]	%
Возраст на начало облучения, лет [Age at exposure beginning, years]						
< 10	4950	30	3518	38	8468	32
10–19	2560	15	1749	19	4309	17
20–39	4911	29	2348	25	7259	28
40–59	2922	17	1155	12	4077	16
60 >	1371	8	592	6	1963	8
Факт переселения [Resettlement]						
Переселённые [Resettled]	6826	41	3823	41	10649	41
Непереселённые [Non-resettled]	9888	59	5539	59	15427	59
Авария, приведшая к облучению [Accident of exposure]						
Только река Теча [Techa only]	9356	56	4529	48	13885	53
Река Теча+ВУРС [Techa +EURT]	775	5	375	4	1150	4
Только ВУРС [EURT only]	6583	39	4458	48	11041	42
Всего [Total]	16714	100	9362	100	26076	100
%	64		36		100	

3 основными национальностями: русские женщины составляли 64% (16 714 человек) изучаемой субкогорты, татары и башкиры – 36% (9362 человека), женщины других национальностей представлены менее 1%. В субкогорте на момент начала наблюдения преобладают молодые женщины в возрасте до 20 лет (45% русских и 57% татар и башкир). Переселённые в чистые населённые пункты составили 41%, непереселявшиеся – 59%. Из общего числа субкогорты 53% женщин были облучены на реке Тече, а 42% – на территории ВУРСа. Чуть более 4% женщин получили облучение в результате 2 аварий.

Жизненный статус

Жизненный статус членов женской субкогорты УКАОН к концу наблюдаемого периода представлен в таблице 2.

Таблица 2

Жизненный статус членов женской субкогорты УКАОН на 31.12. 2019 г.

[Table 2]

Vital status of SUPER cohort members as of 31.12.2019]

Жизненный статус [Vital status]	Человек [Persons]	
	n	%
Жив [Alive]	5194	20
Умер, всего, в том числе: [Total died, including]	11 996	46
причина смерти известна [cause of death is known]	10 786	90
причина смерти неизвестна [cause of death is unknown]	1210	10
Потеряны до 2019 г. [Lost from follow-up before 2019]	2580	10
Всего на ТНЗ [Total persons on the catchment area]	19 770	76
Мигрировали с ТНЗ [Migrants]	6306	24
Всего [Total]	26 076	100

На конец 2019 г. известно, что 20% (5194 человека) членов когорты живы на ТНЗ, 10% (2580 человек) являются потерянными из наблюдения, 46% (11 996 человек) умерли, из них для 90% причина смерти документально подтверждена, 24% (6306 человек) к концу наблюдения мигрировали с ТНЗ.

Случаи ЗНО

Сбор информации о случаях ЗНО в течение 40-летнего периода проводился с использованием разных источников информации на бумажных носителях, а с 2006 г. путём сопоставления электронного областного ракового регистра с регистром облученного населения в УНПЦ РМ. Основным источником о случаях заболевания ЗНО в течение всего периода наблюдения, начиная с 1956 г., являлись извещения о впервые выявленном ЗНО, фиксируемые в областном Челябинском онкодиспансере. Дополнительными источниками служили данные экспертных советов по установлению причинной связи заболевания с облучением, данные клинического отделения УНПЦ РМ из архивных медицинских документов и с текущего приёма, медицинские выписки из других лечебных учреждений Челябинской области, данные регистра

причин смерти и данные ракового регистра облученных, созданного и поддерживаемого в УНПЦ РМ, начиная с 1950-х гг. Часть случаев ЗНО, особенно в ранний период наблюдения, имеет информацию только на основании свидетельств о смерти. Половина (52%) случаев ЗНО имеют информацию из 2 и более источников, что позволяет контролировать качество данных.

Общее число ЗНО женских репродуктивных органов, зарегистрированных на ТНЗ за период с 1956 по 2019 г., включённых в анализ, составило 601 случай. Число человеко-лет под наблюдением на ТНЗ за период с 1956 по 2019 г. составило 972 726. Распределение случаев ЗНО по локализации в зависимости от достигнутого возраста и национальности представлено в таблице 3.

Самыми распространёнными ЗНО женской репродуктивной системы являются ЗНО шейки матки – 283 случая (47%), на втором месте по частоте – ЗНО тела и неутончённой части матки – 174 случая (29%), на третьем – ЗНО яичника (118 случаев, 20%). Из общего числа (601 случай) ЗНО женских репродуктивных органов 435 (72%) ЗНО зарегистрировано у русских женщин, составляющих 64% всей субкогорты. Наиболее частыми ЗНО у русских женщин являлись ЗНО шейки матки, составляющие 51% от 435 ЗНО. В группе женщин татарской и башкирской национальностей доля ЗНО шейки матки составляла только 37%, а доля ЗНО тела матки и неутончённых частей – 38% (для сравнения – у русских женщин доля ЗНО тела матки и неутончённых частей составляла 25%).

По данным таблицы 3 можно видеть, что до 20-летнего возраста не наблюдалось ни одного случая ЗНО, в возрасте от 20 до 40 лет было зарегистрировано всего 53 случая, из которых 40 ЗНО (75%) приходилось на ЗНО шейки матки. Более 91% ЗНО репродуктивных органов зарегистрированы в возрасте старше 40 лет.

Верификация ЗНО

В таблице 4 представлены данные о доступной информации о подтвержденности ЗНО репродуктивных органов за 65-летний период наблюдения членов когорты.

Можно видеть, что в среднем за 65 лет доля морфологической подтвержденности составила 69%. Учитывая, что информация на часть диагнозов была получена ретроспективно, этот показатель за столь длительный период наблюдения можно считать удовлетворительным. Мы предполагаем, что фактически доля подтвержденности была выше, так как диагнозы, зарегистрированные в онкодиспансере при жизни, должны были иметь гистологическое подтверждение, но бумажная документация на них не сохранилась. Доля диагнозов только на основании свидетельств о смерти составила 13%. Основная доля этих случаев приходилась на первые 20 лет, что могло быть связано как с худшей диагностикой в 1950-е гг. в сельской местности, так и с потерей части информации.

Дозовые характеристики

В 2016 г. для расчёта доз облучения людей, проживавших в НП на реке Тече и территории ВУРС, была разработана единая дозиметрическая система TRDS-2016 [9–11]. Эта система включает комплекс программ, которые позволяют рассчитать дозы облучения 23 органов тела человека с учётом компонентов внешнего и внутреннего облучения на основе истории проживания, пола и воз-

Случаи ЗНО женской репродуктивной системы по национальности и достигнутому возрасту

Таблица 3

[Table 3]

Female reproductive system cancers by nationality and attained age]

Характеристики [Characteristics]	Человек [Persons]	Локализация ЗНО репродуктивных органов [Cancer sites of reproductive organs]				
		Всего [Total]	Тело матки и неуточненных частей [Body uterus and unspecified parts]	Шейка матки [Cervix]	Яичник [Ovary]	Плацента, другие женские репродуктивные органы [Placenta, other female genital organs]
Русские [Russians]	16 714	435	111	221	87	16
Татары и башкиры [Tatars and Bashkirs]	9362	166	63	62	31	10
Достигнутый возраст, лет [Attained age, years]						
< 20	11 685	0				
20–39	7514	53	5	40	6	2
40 >	6877	548	169	243	112	24
Всего [Total]	26 076	601	174	283	118	26
%	100	100	29	47	20	4

Методы верификации диагнозов ЗНО женской репродуктивной системы

Таблица 4

[Table 4]

Cancer verifying methods of the female reproductive system]

Вид подтверждения [Confirmation type]	Морфологическое [Morphological]		Инструментальное [Instrumental]		Клиническое [Clinical]		Только свидетельство о смерти [Death certificate only]		Всего, [Total], %	
Локализация [Cancer site]	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
Шейка матки [Cervix]	195	69	0	0	56	20	32	11%	283	100
Тело матки, неуточнённая часть матки [Uterus body, unspecified parts]	123	71	0	0	18	10	33	19	174	100
Яичник [Ovary]	76	64	6	5	21	18	15	13	118	100
Плацента, другие женские репродуктивные органы [Placenta, other female reproductive]	22	85	0	0	3	12	1	4	26	100
Всего [Total]	416	69	6	1	98	16	81	13	601	100

раста каждого человека. Доза рассчитывается для 8 радионуклидов (^{90}Sr , ^{89}Sr , ^{137}Cs , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{144}Ce , ^{103}Ru , ^{106}Ru). Система учитывает параметры метаболизма, связанные с возрастом и размерами тела человека, а также различия в рационе питания и режимах поведения [12–15].

Индивидуальная доза на матку и яичники рассчитывается по годам, начиная с даты вступления в когорту и до даты смерти (для умерших) или до года получения последней информации о жизненном статусе человека. При анализе заболеваемости доступна доза, накопленная к дате диагноза. Также в зависимости от выбранного минимального латентного периода для реализации ЗНО может быть выбрана доза за 2, 5, 10 лет и др. до даты реализации рака. Динамика накопления индивидуальной дозы зависела от истории проживания на загрязнённых территориях и особенно от

начального периода облучения. К 1965 г. члены когорты накопили более 90%, а к 1980 г. – уже 99% дозы, накопленной в 2015 г. На рисунке 1 представлено распределение членов женской субкогорты по дозовым категориям.

По графику можно видеть, что 90% членов когорты получили дозу менее 100 мГр и только 1% (213 человек) – дозу свыше 500 мГр. Средняя доза облучения на матку у женщин всей субкогорты за весь период наблюдения составила 42 мГр, медианная – около 10 мГр, максимальная – 988 мГр, на яичник средняя – около 45 мГр, медианная – 10,4 мГр, максимальная – 1099 мГр. Дозы на матку и яичник были достаточно близки. ИОР заболеваний ЗНО матки, шейки матки и всех репродуктивных органов рассчитывался в зависимости от дозы на матку, а ИОР заболеваний ЗНО яичника – от дозы на яичник.

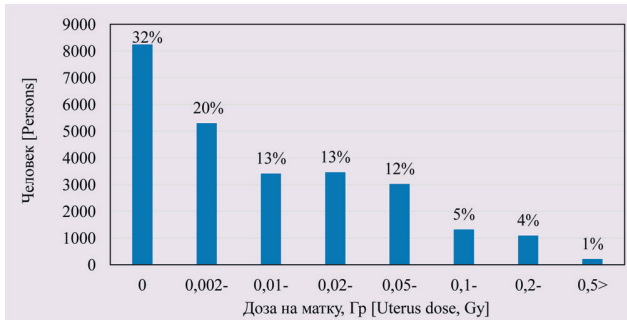


Рис. 1. Распределение членов женской субкогорты по дозовым группам

[Fig. 1. Female distribution by dose categories]

Статистические методы, стратификация данных

Для многофакторного анализа использовалась простая параметрическая модель ИОР.

Модель имела вид:

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

где

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

z_0 – другие факторы, которые могут влиять на базовые уровни (λ_0);

z_1 – факторы, которые могут модифицировать ИОР.

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

Для расчётов применялись программы DATAB и AMFIT статистического пакета EPICURE [16].

С помощью программы DATAB для анализа риска заболеваемости ЗНО женских репродуктивных органов, ЗНО шейки матки, тела матки и неутонченных частей и ЗНО яичника были построены сложно-структурированные таблицы человек-лет и случаев, стратифицированные по следующим параметрам: по национальности (русские, татары и башкиры); факту переселения (переселён, не переселён); году рождения членов когорты (до 1931 г. или позже); календарному периоду (с 1956 г. по 5-летним интервалам по 2019 г.); возрасту на начало облучения (5 категорий: 0-, 10-, 20-, 40-, 60 и более лет); достигнутому возрасту (6 категорий: 0-, 20-, 30-, 40-, 50-, 60 и более лет); территории наблюдения (6 категорий); аварии, в результате которой было облучение (3 категории: только река Теча, обе аварии, только ВУРС); количеству родов (3 категории: 0–2, 3 и более, не известно); наличию доброкачественных новообразований женских репродуктивных органов (да, нет, не известно); наличию предраковых заболеваний (да, нет, не известно); наличию эндокринных и иммунологических расстройств (нет, да, не известно); наличию родственников 1 линии родства со случаями ЗНО репродуктивных органов (есть, нет, не известно); сельский/городской житель (городской – если после миграции из сельской местности проживал в городе 10 и более лет); индекс массы тела (4 категории: <16, 16–30, 30>, не известно); и по дозовым категориям от дозы на матку или яичник (8 категорий: 0-, 0,002-, 0,01-, 0,02-, 0,05-, 0,1-, 0,2-, 0,5> Гр); и с такими же дозовыми

категориями для доз с 2-, 5-, 10- и 15-летними минимальными латентными периодами.

К предраковым заболеваниям женских репродуктивных органов были отнесены воспалительные заболевания репродуктивных органов (РО) (рубрики МКБ-9: 617, 620.0–620.3, 621.0, 621.2–621.3, 622.0–622.2, 622.7, 623.7, 624.0, 624.6). Выбор МКБ 9-го пересмотра обусловлен длительным периодом наблюдения за членами когорты. За это время сменилось 3 пересмотра МКБ (с 7-го по 10-й). На протяжении самого продолжительного периода диагностики кодировались по МКБ-9.

К доброкачественным новообразованиям РО женщин были отнесены заболевания согласно соответствующему списку в МКБ-9 (рубрики 218–221, 233.1–233.3, 234.8–234.9).

Оценка базовых уровней заболевания ЗНО репродуктивных органов вычисляется программой AMFIT пакета EPICURE. Программа позволяет количественно оценить одновременное влияние различных факторов на показатели заболеваемости ЗНО независимо от дозы и оценить их статистическую значимость. При последующей оценке дозовой зависимости уровней заболеваемости ЗНО для различных групп членов когорты учитывается влияние выявленных статистически значимых факторов на базовые уровни.

Для расчётов непосредственно величин ИОР заболеваний ЗНО РО также применялась программа AMFIT, в которой использовались стратифицированные таблицы человеко-лет и случаев, построенные с помощью программы DATAB.

Достоверность результатов и доверительные интервалы (ДИ) оценивались методом максимального правдоподобия с 95% вероятностью.

Результаты анализа риска

Оценка базовых уровней заболеваемости ЗНО репродуктивных органов

С помощью программы AMFIT было выявлено влияние доступных нерадиационных факторов на базовые уровни заболеваемости ЗНО репродуктивных органов, которое отличалось для разных локализаций. При анализе заболеваемости ЗНО шейки матки выявлено влияние на базовые уровни национальности (выше у русского населения), года рождения членов когорты (выше у лиц, родившихся после 1931 г.); достигнутого возраста (увеличивается с возрастом), а также календарного периода (выше после 1990 г.).

Для ЗНО тела матки значимое влияние на базовые уровни оказывали: достигнутый возраст (заболеваемость увеличивалась с увеличением возраста), год рождения членов когорты (у родившихся после 1931 г. риск ЗНО матки увеличивался), количество родов (3 и более родов уменьшало риск ЗНО матки), национальная принадлежность и календарный период.

Для ЗНО яичников значимое влияние на базовые уровни оказывали национальная принадлежность, год рождения членов когорты (до 1931 г. или после); достигнутый возраст.

При анализе заболеваемости ЗНО всех РО оценка параметров для включения в модель расчёта базовых уровней показала статистически значимое влияние на величину коэффициентов заболеваемости ЗНО РО при одновременном включении в расчёт следующие

щих параметров: национальности (выше у русского населения), года рождения членов когорты (выше после 1931 г.), достигнутого возраста и количества родов (выше у малорожавших).

Общие тенденции были следующие: базовые показатели (независимые от дозы) были выше у русского населения (особенно для ЗНО ШМ), у лиц, родившихся после 1931 г., у лиц, достигших 50-летнего возраста.

Дозовая зависимость

Как отмечено выше, анализ риска заболевания ЗНО всех РО, ЗНО шейки матки и тела матки у женщин УКАОН был проведён в зависимости от дозы на матку, для ЗНО яичников – от дозы, накопленной в яичниках.

С помощью программы AMFIT было проведено тестирование вида дозовой зависимости для заболеваний ЗНО всех РО (табл. 5), для ЗНО ШМ (табл. 6), а также ЗНО тела матки и неутонченных частей матки и ЗНО яичника.

Было получено, что наилучшим образом дозовая зависимость описывалась линейной моделью как для ЗНО всех РО, так и для отдельных локализаций (см. табл. 5 и 6).

При оценке ИОР заболевания ЗНО всех РО с помощью линейной модели дозовая зависимость была значимой ($P=0,017$). Добавление к линейной модели квадратичного компонента не улучшало подгонку модели, различие было незначимым ($P>0,5$) как и само значение ($P=0,06$).

Квадратичная модель описывала дозовую зависимость значимо ($P=0,013$). При этом точечная величина ИОР/Гр была в 2 раза выше, а диапазон ДИ был в 2 раза шире (4,95 против 2,12), и параметр «Отклонение» был больше, чем при линейной модели.

В таблице 6 представлены аналогичные показатели для ИОР ЗНО шейки матки. Рассчитанные величины ИОР для ЗНО шейки матки были также значимы при использовании как линейной ($p=0,013$), так и квадратичной модели ($p=0,02$).

При анализе ИОР заболеваемости ЗНО всех репродуктивных органов и ЗНО ШМ сравнение моделей показало, что линейная модель лучше квадратичной описывает дозовую зависимость (доверительный интервал значения ИОР уже, а параметр «Отклонение» меньше для линейной модели относительно квадратичной) (см. табл. 5 и 6).

Значимой дозовой зависимости заболеваемости ЗНО матки и яичника при использовании любых моделей не наблюдалось, поэтому сравнение моделей для этих локализаций в таблицах не приводится.

Тестирование влияния различного минимального латентного периода на значимость и величину ИОР при использовании периода отставания в 2, 5 и 10 лет не показало значимых различий ни в величине ИОР/Гр (1,17; 1,16; 1,34 соответственно), ни в значении p -величины (0,015; 0,018; 0,01 соответственно), ни в различии вели-

Тестирование разных моделей дозовой зависимости: оценки риска для ЗНО всех женских РО

Testing different dose dependence models: cancer risk values for all female reproductive organs]

Таблица 5

[Table 5]

Модель [Model]	ИОР/Гр [ERR/Gy]	95% ДИ [95% CI]	Избыток [Excess]	P	Параметр модели: Отклонение [Model parameter: Deviation]	Атрибутивный риск, % [Attributable risk]
Линейная [Linear]	1,16	0,18; 2,40	30,0	0,017	6481,742	5,0
Квадратичная [Quadratic]	2,46	0,31; 5,26	15,6	0,013	6482,086	2,6
Линейно-квадратичная [Linear-quadratic]	1,54		26,9	0,06	6499,695	4,5
Линейный компонент [Linear component]	0,87	-1,74; 3,86				
Квадратичный компонент [Quadratic component]	0,67	nf <0*; 6,85				

nf* – граница 95% ДИ не может быть вычислена в связи с большой неопределённостью [nf* (not found) 95% confidence interval bounds cannot be calculated due to large uncertainty]

Тестирование разных моделей дозовой зависимости: оценки риска ЗНО шейки матки

Testing different dose dependence models: risk value for cervical cancer]

Таблица 6

[Table 6]

Модели [Models]	ИОР/Гр [ERR/Gy]	95% ДИ [95% CI]	Избыток [Excess]	P	Параметр модели: Отклонение [Model parameter: Deviation]	Атрибутивный риск, % [Attributable risk]
Линейная [Linear]	1,80	0,32; 3,82	21,4	0,0128	3430,395	7,6
Квадратичная [Quadratic]	3,82	0,49; 8,44	11,86	0,0199	3431,172	4,2
Линейно-квадратичная [Linear-quadratic]	1,39		22,65	0,045	3430,378	8

Окончание таблицы 6

Модели [Models]	ИОР/Гр [ERR/ Gy]	95% ДИ [95% CI]	Избыток [Excess]	P	Параметр модели: Отклонение [Model parameter: Deviation]	Атрибутивный риск, % [Attributable risk]
Линейный компонент [Linear component]	2,10	nf * <0; 7,09	22,72			
Квадратичный компонент [Quadratic component]	- 0,74	nf <0; 9,97				

nf* – граница 95% ДИ не может быть вычислена в связи с большой неопределённостью [nf* (not found) 95% confidence interval bounds cannot be calculated due to large uncertainty]

чины отклонения (параметр «Deviation»). В связи с этим мы использовали общепринятый 5-летний латентный период для расчёта величины ИОР ЗНО всех локализаций репродуктивных органов у женщин УКАОН для лучшего сопоставления величин ИОР при сравнении с другими исследованиями. Таким образом, для анализа была использована линейная модель с 5-летним минимальным латентным периодом.

Анализ заболеваемости всех РО у женщин УКАОН показал статистически значимую линейную дозовую зависимость. Величина ИОР заболевания ЗНО женских РО составила 1,16/Гр (95% ДИ: 0,18–2,4); $p=0,017$.

В таблице 7 представлены человеко-годы, наблюдаемые случаи ЗНО репродуктивных органов у женщин УКАОН, а также рассчитанные по модели избыточные и

базовые случаи и атрибутивный риск в зависимости от дозовых категорий. Атрибутивный риск рассчитан как отношение избыточных случаев к сумме всех (избыточных и базовых) случаев, рассчитанных по модели.

Можно видеть, что в наибольшей дозовой группе атрибутивный риск составил около 41%, а во всей когорте за весь период наблюдения – 5%, что предполагает, что 30 из 601 ЗНО женских РО могли быть связаны с радиационным воздействием.

ИОР заболеть ЗНО шейки матки за весь период наблюдения для женщин УКАОН составил 1,80/Гр, 95% ДИ: 0,32–3,82; $p<0,013$ (см. табл. 6).

В таблице 8 представлены наблюдаемые и избыточные случаи ЗНО шейки матки и атрибутивный риск в зависимости от дозовых категорий.

Таблица 7

Атрибутивный риск, наблюдаемые и избыточные случаи ЗНО всех репродуктивных органов по дозовым категориям

[Table 7]

Attributable risk, observed and excess cases of cancer reproductive organs by dose categories]

Средняя доза в группе, Гр [Mean dose, Gy]	Человеко-лет [Person-years]	ЗНО РО [Cancers of reproductive organs]	Рассчитанные по линейной модели [Calculated by linear model]		
			Избыточные ЗНО [Excess cancers]	Базовые ЗНО [back- ground cancers]	Атрибутивный риск, % [Attributable risk]
0,001	247 503	160	0,13	159,62	0,1
0,005	121 733	90	0,63	97,43	0,6
0,015	101 940	104	1,64	92,60	1,7
0,030	96 521	95	3,09	92,14	3,2
0,075	102 805	72	5,88	68,02	8,0
0,136	40 069	33	4,48	28,94	13,4
0,323	33 261	40	10,33	26,88	27,8
0,601	5221	7	3,76	5,44	40,8
Всего	749 053	601	30	571	5,0

Таблица 8

Атрибутивный риск, наблюдаемые и избыточные случаи ЗНО шейки матки по дозовым категориям

[Table 8]

Attributable risk, observed and excess cases of cervical cancer by dose categories]

Средняя доза в группе, Гр [Mean dose, Gy]	Человеко-лет [Person-years]	ЗНО шейки матки [Cervical cancer]	Рассчитанные по линейной модели		
			Избыточные ЗНО [Excess of cancers]	Базовые ЗНО [Background cancers]	Атрибутивный риск, % [Attributable risk]
0,001	247 503	74	0,1	74,4	0,1
0,005	121 733	43	0,4	42,4	1,0

Средняя доза в группе, Гр [Mean dose, Gy]	Человеко-лет [Person-years]	ЗНО шейки матки [Cervical cancer]	Рассчитанные по линейной модели		
			Избыточные ЗНО [Excess of cancers]	Базовые ЗНО [Background cancers]	Атрибутивный риск, % [Attributable risk]
0,015	101 940	49	1,3	46,1	2,7
0,030	96 521	47	2,2	42,7	4,9
0,075	102 805	28	3,7	28,2	11,7
0,136	40 069	14	2,9	12,0	19,4
0,323	33 261	25	7,8	12,9	37,7
0,601	5221	3	3,0	2,8	51,8
Всего	749 053	283	21,4	261,6	7,6

Атрибутивный риск в дозовых категориях рассчитан по модельным данным аналогично описанному выше методу.

Из таблицы 8 видно, что 21 из 283 случаев ЗНО шейки матки мог быть обусловлен воздействием радиации. Общий атрибутивный риск заболеть ЗНО шейки матки у женщин УКАОН составил 7,6%. В наибольшей дозовой группе (свыше 500 мГр) радиационно-обусловленные случаи могли составить около 52%.

На рисунке 2 наглядно представлена дозовая зависимость заболеваемости ЗНО шейки матки (голубой цвет) и всех ЗНО репродуктивных органов (красный цвет), согласно разным моделям. Можно видеть, что линейная (сплошная линия) и квадратичная (большой пунктир) модели, а также точечные оценки риска в дозовых группах все лежат внутри диапазона доверительных интервалов (мелкий штрих) линейной модели, как для ЗНО ШМ, так и для всех РО.

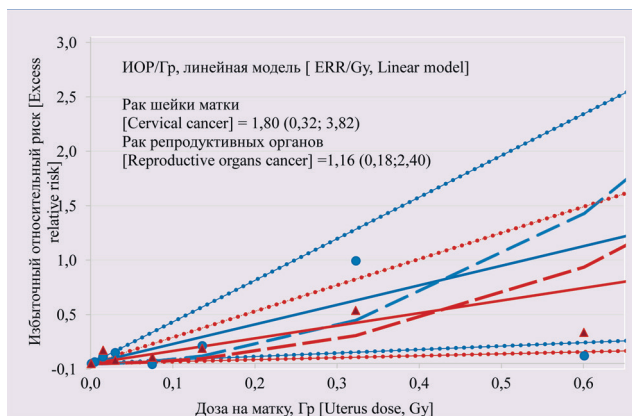


Рис. 2. Дозовая зависимость заболеваемости ЗНО шейки матки (голубой цвет) и всех репродуктивных органов (красный цвет), описанная линейной моделью (толстая линия) с доверительными интервалами (мелкий пунктир), квадратичной моделью (жирный пунктир) и непараметрическими оценками в дозовых группах (точки и треугольники)

[Fig. 2. Cancer incidence dose dependence of the cervix (blue color) and all reproductive organs (red color), described by linear model (bold linear) with confidence intervals (small dotted line), quadratic model (bold dotted line) and non-parametric estimates in dose groups (points and triangles)]

Анализ риска заболевания ЗНО тела матки и неутробной части матки не выявил значимой линейной зависимости от дозы на матку. Величина ИОР была положительной, но незначимой ($p=0,312$) и составила 0,86/Гр (95% ДИ: -0,62; 3,2). При добавлении квадратичного компонента, улучшения модели не наблюдалось ($p=0,22$), и число избыточных случаев становилось отрицательным. Оценка ИОР с использованием квадратичной модели также была незначима. ИОР составил 2,67/Гр (95% ДИ: <-1; 8,55). Применение для расчёта минимальных латентных периодов 2 года и 10 лет значимость не увеличивало ($p=0,26$ и $P>0,5$ соответственно).

Анализ риска заболевания ЗНО яичника не выявил какой-либо (линейной, квадратичной или линейно-квадратичной) значимой зависимости от дозы на яичник. Величина ИОР при использовании всех моделей была отрицательной и незначимой ($P>0,5$).

Модификация ИОР нерадиационными факторами

В работе была также оценена возможная модификация величины риска заболевания ЗНО всех РО или ШМ нерадиационными факторами, доступными в данном исследовании (табл. 9).

Риск заболевания ЗНО всех репродуктивных органов, суммарно зависящий от дозы, чаще наблюдался у русского населения. Значимый риск развития ЗНО шейки матки, связанный с облучением, выявлен у татар и башкир. У переселённого населения, получившего большие дозы облучения, значимые риски наблюдались как для заболеваемости ЗНО шейки матки, так и всех РО вместе.

Показатели избыточного риска для ЗНО шейки матки и всех РО суммарно были значимы у населения, облучённого на реке Тече, что можно связать с большими дозами у жителей прибрежных сёл. Величина ИОР для облучённых только на ВУРСе (при исключении из группы лиц, получивших облучение и на ВУРСе, и на реке Тече), была незначима и имела большие неопределённости, что связано с тем, что средняя доза в группе составляла всего 11 мГр. Значимые риски от облучения наблюдались также у сельского населения, в группе нерожавших женщин или имеющих менее 3 родов.

Зависимость избыточного риска ЗНО репродуктивных органов от возраста представлена в таблице 10. Значимый риск развития ЗНО как шейки матки, так и всех

Величины ИОР в различных группах женской субкогорты
Risk values by different groups of female subcohort]

Таблица 9

[Table 9

Параметры (число ЗНО РО/ШМ) [Parameters, (cancers number of reproductive organs/Cervix)]	ИОР/Гр [ERR/Gy]	95% ДИ [95% CI]	Атрибутивный риск, % [Attributable risk]	ИОР/Гр [ERR/Gy]	95% ДИ [95% CI]	Атрибутивный риск, % [Attributable risk]
Локализация ЗНО [Cancer sites]	Все женские репродуктивные органы [All repro- ductive organs]			Шейка матки [Cervix]		
Все женщины, [All females] (601/283)	1,16	0,18; 2,40	5,0	1,80	0,32; 3,82	7,6
Национальность [Nationality]						
Татары и башкиры [Tatars and Bashkirs], (166/62)	1,00	-0,79;3,69	5,6	4,00	0,26; 10,93	19,6
Русские [Russians], (435/221)	1,21	0,10;2,68	4,6	1,29	-0,17;3,42	5,1
Факт переселения [Resettlement]						
Переселенные [Resettled], (257/124)	1,16	0,18;2,40	9,3	1,79	0,32;3,79	14,2
Непереселенные [Non-resettled], (344/159)	0,57	nf **<0; 5,27	0,9	-1,40	-6,85;6,13	-2,2
Календарный период [Calendar period]						
< 1990 (339/221)	1,0	-0,09;2,46	4,5	1,39	-0,07;3,48	6,1
1990 > (262/62)	1,49	-0,16;3,77	6,0	4,14	0,02;11,77	14,7
Авария, приведшая к облучению [Accident of exposure]						
Все облучённые на реке Тече [All, exposed on the Tеча], (413/196)	1,15	0,17;2,39	6,7	1,80	0,32;3,83	10,3
Только ВУРС [EURT only], (188/87)	3,38	-2,99;12,21	3,0	2,42	-7,29;18,97	1,8
Городской/сельский житель [Urban/rural]						
Сельский [Rural], (467/235)	1,38	0,30;2,77	6,1	1,83	0,25; 4,00	7,6
Городской [Urban], (134/48)	-0,07	nf <0;2,48	-0,3	1,66	nf <0; 6,4	7,2
Количество родов [Number of births]						
Роды <3 и нерожавшие [Childbirth <3 and nulliparous], (304/137)	1,9	0,32;4,09	7,1	3,05	0,68;6,47	10,5
Роды 3 и > [Childbirth 3 and >], (212/115)	0,17	-0,87;1,78	1,0	0,39	nf<0;2,74	2,1
Неизвестно [Unknown], (85/31)	2,53	-0,45;7,95	6,8	3,34	-0,56;10,43	11,5

nf* – граница 95% ДИ не может быть вычислена в связи с большой неопределённостью. [nf* (not found) 95% confidence interval
bounds cannot be calculated due to large uncertainty]

Таблица 10

Влияние возраста на величину риска ЗНО

Age effect on the risk of cancer]

[Table 10

Локализация ЗНО [Cancer sites]	Все женские репродуктивные органы [All reproductive organs]		Шейка матки [Cervix]	
Параметры (число ЗНО РО/ШМ) [Parameters, (cancers number of reproductive organs/cervix)]	ИОР/Гр [ERR/Gy]	(95% ДИ) [95% CI]	ИОР/Гр [ERR/Gy]	(95% ДИ) [95% CI]
Возраст начала облучения, лет [Age at the beginning of exposure, years]				
10	1,4	0,05; 3,50	2,72	0,26;6,95
40	0,93	nf*; 2,92	1,22	nf <0;3,94

Локализация ЗНО [Cancer sites]	Все женские репродуктивные органы [All reproductive organs]		Шейка матки [Cervix]	
Параметры (число ЗНО РО/ШМ) [Parameters, (cancers number of reproductive organs/cervix)]	ИОР/Гр [ERR/Gy]	(95% ДИ) [95% CI]	ИОР/Гр [ERR/Gy]	(95% ДИ) [95% CI]
Достигнутый возраст, лет [Attained age, years]				
30	0,58	nf <0;5,51	0,85	nf <0; 5,52
50	0,98	0,01;2,41	2,07	0,40;4,40

nf* (not found) – граница 95% ДИ не может быть вычислена в связи с большой неопределённостью. [nf* (not found) 95% confidence interval bound cannot be calculated due to the large uncertainty]

РО наблюдался у лиц, получивших облучение в раннем возрасте (10 лет) и у лиц, достигших возраста 50 лет.

Обсуждение

Анализ риска развития ЗНО репродуктивных органов у женщин УКАОН проведён впервые. Получение значимых оценок ИОР в отдельных группах членов когорты и разных локализаций ЗНО стало возможным в связи с увеличением статистической силы исследования. Это связано с увеличением численности анализируемой популяции при объединении населения, облученного в 2 радиационных авариях на Южном Урале (на реке Тече и на ВУРСе) в 1 когорту. Ранее значимые результаты мы могли получать только при анализе всех солидных ЗНО вместе. В настоящем исследовании получена статистически значимая величина ИОР развития ЗНО шейки матки. При этом точечные оценки ИОР выше, чем во всей субкогорте, наблюдаются в группе татар и башкир; в период после 1990 г.; у женщин, рожавших менее 3 раз; у начавших облучаться в 10 лет и у достигших возраста 50 лет (см. табл. 9, 10). При этом ДИ значений ИОР в этих группах и во всей субкогорте перекрываются, и значимых различий мы не наблюдаем. Значимые величины ИОР заболевания ЗНО шейки матки были получены также в группах переселённого населения, у облученных на реке Тече, у сельского населения. Но в группах сравнения величины ИОР были незначимы и корректного сравнения на данном этапе получить не удалось. При этом точечная оценка и доверительные интервалы ИОР в последних группах были сопоставимы с таковыми во всей женской субкогорте. В данном исследовании мы также впервые пытались оценить величину ИОР в категориях с наличием предраковых заболеваний, доброкачественных заболеваний, заболеваний с иммунными нарушениями и эндокринными патологиями. В анализе для каждого из указанных показателей были сформированы 3 категории: 1) есть заболевание; 2) есть информация, но нет заболевания; 3) нет информации. ИОР рассчитывался для всех 3 категорий в каждой из указанных групп заболеваний. На данном этапе все величины ИОР в этих группах имели большую неопределённость и были незначимы, они не указаны в таблицах в связи с малой информативностью.

Расчёт величины риска ЗНО всех РО также показал значимую дозовую зависимость ИОР/Гр = 1,16 (95% ДИ: 0,18–2,4). Значимые величины ИОР были получены и в отдельных группах – у русского населения (при этом в группе татар и башкир ИОР был незначим, в отличие от ИОР ЗНО шейки матки) и в группе переселённых жен-

щин (с величиной риска, аналогичной для всех женщин). Значимый показатель наблюдался у облученных на реке Тече женщин; у проживавших в сельской местности и у женщин, рожавших менее 3 раз. Величина риска в этих группах не имела значимых отличий от таковой у всех женщин.

При сравнении полученных результатов с аналогичными исследованиями дозовой зависимости ЗНО репродуктивных органов, проводившимися в японской когорте [8], можно отметить, что в когорте LSS значимая дозовая зависимость была выявлена только для рака тела матки (ИОР/Гр=0,73, 95% ДИ: 0,03–1,87), которая зависела от возраста и была максимальной при начале облучения в возрасте от 11 до 15 лет. Величина ИОР/Гр ЗНО ШМ в японской когорте была незначима и составила 0,08 (-0,17; 0,42) [8].

Для понимания причин данных различий требуется дальнейшее изучение возможного влияния на эффект дополнительных модифицирующих факторов и более детальное исследование зависимости данных показателей от возрастных особенностей и разных исходных уровней заболеваемости ЗНО репродуктивных органов в разных популяциях, а также разного влияния острого и хронического облучения, мощности дозы.

Дальнейшее увеличение периода наблюдения и человеко-лет под риском поможет уменьшить неопределённости и увеличить значимость величин риска в отдельных группах по возрасту и другим нерадиационным факторам.

Заключение

Статистически значимый ИОР заболеваемости ЗНО, зависимый от дозы, был получен для ЗНО шейки матки (ИОР/Гр = 1,8, 95% ДИ: 0,32; 3,82) и для всех органов репродуктивной системы женщин – 1,16 (95% ДИ: 0,18; 2,40). Зависимость имела линейный характер.

Наблюдалась модификация дозового эффекта следующими нерадиационными факторами: более высокий ИОР ЗНО всех репродуктивных органов наблюдался у русского населения, а для ЗНО шейки матки дозовая зависимость была более выражена у татар и башкир. Более высокие риски наблюдались у переселённого населения; у лиц, облученных на реке Тече; у сельского населения; в период после 1990 г. Увеличенный риск развития ЗНО репродуктивных органов в зависимости от возраста наблюдался у получивших облучение в более раннем возрасте (10 лет) и у достигших возраста 50 лет. В возрастных группах других категорий риск был не значим. Более

высокий риск заболеть ЗНО, зависимость от дозы, наблюдался в группе женщин, имеющих менее 3 родов, включая нерожавших.

Полученные результаты будут хорошим дополнением знаний и количественных оценок риска ЗНО женских репродуктивных органов при длительном облучении в диапазоне доз ниже 1 Гр и преимущественно в низких дозах.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Крестинина Л.Ю. – анализ риска, дизайн статьи, написание статьи.

Силкин С.С. – подготовка данных к анализу, участие в анализе риска, обсуждение результатов, написание разделов статьи.

Благодарности

Работа выполнена в рамках выполнения НИР по Государственному заданию. Авторы приносят благодарность коллективу отдела Базы данных «Человек» под руководством Н.В. Старцева, за обновление данных по жизненному статусу, местам проживания и причинам смерти членов когорты и коллективу эпидемиологической лаборатории за обновление информации, верификацию данных о случаях заболеваний ЗНО у облученного населения и подготовку данных к анализу. Авторы признательны коллективу биофизической лаборатории и лично М.О. Дегтевой за предоставление индивидуальных доз на репродуктивные органы женщин для проведения анализа.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального медико-биологического агентства России в рамках реализации государственного заказа по теме «Риски развития органоспецифических новообразований при хроническом облучении в Уральской когорте аварийно-облученного населения».

Литература

1. Последствия радиоактивного загрязнения реки Течи. Под ред. А.В. Акеева. Челябинск: Книга, 2016. 400 с.
2. Последствия техногенного радиационного воздействия и проблемы реабилитации Уральского региона. Под ред. С.К. Шойгу. М.: Комтехпринт, 2002. 287 с.
3. Экологические и медицинские последствия радиационной аварии 1957 года на ПО «Маяк». Под ред. А.В. Акеева и М.Ф. Киселева. М.: ФУ «Медбиоэкстрем» при Минздраве РФ, 2001. 294 с.
4. Силкин С.С., Крестинина Л.Ю., Старцев В.Н., Акеев А.В. Уральская когорта аварийно-облученного населения // Медицина экстремальных ситуаций. 2019. № 3. С. 393–402.
5. Минаков С.Н. Заболеваемость и смертность от рака молочной железы и женских половых органов (шейки матки, тела матки, яичников) в Московской области в 2015 году // Злокачественные опухоли. 2017. Т. 7, № 1. С. 67–69. DOI: 10.18027/2224-5057-2017-1-67-69.
6. Мороз Г.С. Злокачественные новообразования женских половых органов у лиц, подвергшихся переоблучению в условиях производства // Бюллетень радиационной медицины. 1978. Т. 4. С. 37–40.
7. Козаченко В.П. Рак женских половых органов; профилактика, диагностика, лечение // Сибирский онкологический журнал. 2002. Т. 3–4. С. 21–23.
8. Utada M., Brenner A.V., Preston D.L., et al. Radiation risks of uterine cancer in atomic bomb survivors: 1958–2009 // JNCI Cancer Spectrum. 2018. Vol. 2, № 4. P. 1–6. DOI: 10.1093/jncics/pky081.
9. 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, № 4. P. 378–387. DOI: 10.1097/HP.0000000000001067.
10. Дегтева М.О., Толстых Е.И., Воробьева М.И., и др. Дозиметрическая система реки Теча: настоящее и будущее // Вопросы радиационной безопасности. 2006. № 1. С. 81–95.
11. Shagina N.B., Vorobiova M.I., Degteva M.O., et al. Reconstruction of the contamination of the Techa River in 1949–1951 as a result of releases from the “MAYAK” Production Association // Radiation Environmental Biophysics. 2012. Vol. 51. P. 349–366.
12. Tolstykh E.I., Degteva M.O., Peremyslova L.M., et al. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: Strontium-90 // Health Physics. 2011. Vol. 101, № 1. P. 28–47.
13. Tolstykh E.I., Degteva M.O., Peremyslova L.M., et al. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: 137Cs // Health Physics. 2013. Vol. 104, № 5. P. 481–498.
14. Tolstykh E.I., Peremyslova L.M., Degteva M.O., Napier B.A. Reconstruction of radionuclide intakes for the residents of East Urals Radioactive Trace (1957–2011) // Radiation Environmental Biophysics. 2017. Vol. 56. P. 27–45. DOI 10.1007/s00411-016-0677-y.
15. Shagina N.B., Tolstykh E.I., Degteva M.O., et al. Age and gender specific biokinetic model for strontium in humans // Journal of Radiological Protection. 2015. Vol. 35, № 1. P. 87–127.
16. Preston D.L., Lubin J., Pierce D., McConney. Epicure Users Guide. Seattle, Washington: Hirosoft International Company, 1993.

Поступила: 19.12.2022 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
ORCID® <https://orcid.org/0000-0003-0497-5879>

Силкин Станислав Сергеевич – младший научный сотрудник эпидемиологической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины ФМБА России, Челябинск, Россия.
ORCID® <https://orcid.org/0000-0002-4412-4481>

Для цитирования: Крестинина Л.Ю., Силкин С.С. Риск онкологических заболеваний репродуктивных органов у женщин Уральской когорты аварийно-облученного населения: 1956–2019 // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 1. С. 91–103. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-91-103

Cancer incidence risk of female reproductive organs in the Southern Urals Populations Exposed to Radiation Cohort: 1956–2019

Lyudmila Yu. Krestinina, Stanislav S. Silkin

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

The objective of the study is to obtain direct estimates of the excess relative risk of the reproductive organ cancer in women from the cohort of the Southern Urals population exposed to radiation under chronic exposure in the dose range not exceeding 1 Gy. Materials and Methods: The analytical cohort of the Southern Urals population exposed to radiation of women included 26,076 individuals with a follow-up period of 65 years (1956 to 2019) and 749,053 person-years at risk. The cancer incidence catchment area is limited to five districts of the Chelyabinsk region, the city of Chelyabinsk and the city of Ozyorsk. Over a 65 year-period 601 cases of the reproductive organ cancers have been registered in the incidence catchment area. The average cumulative dose to the uterus for women in the analytical cohort was 42 mGy; the maximum dose was 988 mGy. A regression analysis with a simple parametric model of the excess relative risk was used in the study. The significance of the results was assessed by the maximum likelihood method with 95% probability. Calculations were performed with the statistical software package "Epicure". Results: The risk analysis revealed a statistically significant linear dependence of the excess relative risk of the cervical cancer incidence and that of all reproductive organ cancers in total on the dose accumulated in the walls of the uterus. The paper assesses the influence of modifying factors available for analysis on the magnitude of the risk. No dependence of either uterine body cancer risk on the dose to the uterus or ovary cancer risk on the dose to the ovaries was revealed. The possibility of obtaining significant risk values of the development of site-specific cancers appeared with an increase in the size of the analyzed population as a result of combining people exposed in the Southern Urals in two radiation accidents into one cohort, which increased the statistical power of the study. Assessment of the excess relative risk of the reproductive organ cancer in this cohort was carried out for the first time. This cohort has a great potential for further research to obtain direct estimates of the radiation risk of cancer and non-cancer diseases due to chronic exposure in the dose range up to 1 Gy.

Key words: Southern Urals Population Exposed to Radiation cohort (SUPER), excess relative risk, reproductive organs, cervical cancer, exposed population

Authors' personal contribution

Krestinina L.Yu. – risk analysis, article design, article writing. Silkin S.S. – preparing data for analysis, participation in risk analysis, discussing the results, article writing.

Acknowledgments

The work was carried out as part of the implementation of research work under the State order. The authors are grateful to the staff of the Department of the Database "Man", led by Startsev N.V., for updating the data on the vital status, places of residence, and causes of death of the cohort members and the staff of the epidemiological laboratory for updating the information, verifying the data on cases of malignant neoplasms in an exposed population, preparing data for analysis. The

authors are grateful to the staff of the Biophysical Laboratory and personally to M.O. Degteva for providing individual doses to the reproductive organs of women for analysis.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Sources of financing

The work was carried out with the financial support of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, as part of the implementation of the state order on the topic "Risks of the development of organ-specific neoplasms during chronic exposure in the Ural cohort of the emergency-exposed population".

Lyudmila Yu. Krestinina

Urals Research Center for Radiation Medicine

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

Reference

1. Consequences of radioactive contamination of the Techa River. Ed. by Akleev AV. Chelyabinsk; 2016. 400 p. (In Russian).
2. Consequences of anthropogenic radiation exposure and rehabilitation problems of the Ural region. Ed. by Shoygu SK. Moscow; 2002. 287 p. (In Russian).
3. Ecological and medical consequences of the 1957 radiation accident at Mayak PA. Ed. by Akleyev AV, Kiselev MF. Moscow: Medbioekstrem; 2001. 294 p. (In Russian).
4. Silkin SS, Krestinina LYu, Startsev VN, Akleev AV. Ural cohort of emergency-irradiated population. *Medicine of Extreme Situations = Meditsina ekstremalnykh situatsiy*. 2019;21(3): 393-402. (In Russian).
5. Minakov SN. Morbidity and mortality from breast cancer and female genital organs (cervix, uterus, ovaries) in the Moscow region in 2015. *Malignant tumours*. 2017;(1):67-69. (In Russian).
6. Moroz GS. Gynecological malignant neoplasms in occupationally overexposed to ionizing radiation individuals. *Byulleten radiatsionnoy meditsiny = Radiation Medicine Bulletin*. 1978;4: 37-40. (In Russian).
7. Kozachenko VP. Gynecological cancers: prevention, diagnostics, treatment. *Sibirskiy onkologicheskii zhurnal = Siberian Journal of Oncology*. 2002;(3-4):21-3. (In Russian).
8. Utada M, Brenner AV, Preston DL, Cologne JB, Sakata R, Sugiyama H, et al. Radiation risks of uterine cancer in atomic bomb survivors: 1958-2009. *JNCI Cancer Spectrum*. 2018;2(4): 1-6. DOI: 10.1093/jncics/pky081.
9. Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, Shishkina EA, Shagina NB, Volchkova AY, 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.
10. Degteva MO, Tolstykh EI, Vorobiova MI, Shagina NB, Anspaugh LR, Napier BA, et al. Techa river dosimetric system: present and future. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Issues of radiation safety*. 2006;(1): 81-95. (In Russian).
11. Shagina N, Vorobiova MI, Degteva MO, Peremyslova LM, Shishkina EA, Anspaugh LR, et al. Reconstruction of the contamination of the Techa River in 1949-1951 as a result of releases from the "MAYAK" Production Association. *Radiation Environmental Biophysics*. 2012;51(4): 349-366.
12. Tolstykh EI, Degteva MO, Peremyslova LM, Shagina NB, Shishkina EA, Krivoschapov VA, et al. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: Strontium-90. *Health Physics*. 2011;101(1): 28-47.
13. Tolstykh EI, Degteva MO, Peremyslova LM, Shagina NB, Vorobiova MI, Anspaugh LR, et al. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: ¹³⁷Cs. *Health Physics*. 2013; 104(5):481-498.
14. Tolstykh EI, Peremyslova LM, Degteva MO, Napier BA. Reconstruction of radionuclide intakes for the residents of East Urals Radioactive Trace (1957-2011). *Radiation Environmental Biophysics*. 2017;56(1): 27-45. DOI:10.1007/s00411-016-0677-y.
15. Shagina NB, Tolstykh EI, Degteva MO, Anspaugh LR, Napier BA. Age and gender specific biokinetic model for strontium in humans. *Journal of Radiological Protection*. 2015;35(1): 87-127. doi: 10.1088/0952-4746/35/1/87.
16. Preston DL, Lubin J, Pierce D, McConney. *Epicure Users Guide*. Seattle, Washington: Hirosoft International Company; 1993.

Received: December 19, 2022

For correspondence: Lyudmila Yu. Krestinina – candidate of medical sciences, head of the epidemiological laboratory of Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia. (68A Vorovsky street, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: ludmila@urcrm.ru)

ORCID[®] <https://orcid.org/0000-0003-0497-5879>

Stanislav S. Silkin – junior researcher of epidemiological laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

ORCID[®] <https://orcid.org/0000-0002-4412-4481>

For citation: Krestinina L.Yu., Silkin S.S. Cancer incidence risk of female reproductive organs in the Southern Urals Populations Exposed to Radiation Cohort: 1956–2019. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 1. P. 91-103. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-91-103

Динамика содержания ^{137}Cs в кормах сельскохозяйственных животных в районах Брянской области, пострадавших после аварии на ЧАЭС

С.В. Фесенко¹, П.В. Прудников², Н.Н. Исамов¹, Е.С. Емлютина¹,
И.Э. Елифанова¹, О.А. Шубина¹

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

² Брянский центр «Агрохимрадиология», п. Мичуринский, Брянская область, Россия

Публикация продолжает цикл работ, посвященных изучению закономерностей изменения содержания ^{137}Cs в продукции сельскохозяйственного производства после аварии на Чернобыльской АЭС. Целью исследований являлся анализ информации, описывающей изменение содержания ^{137}Cs в кормах сельскохозяйственных животных в юго-западных районах Брянской области. Приведены данные по проведению защитных мероприятий в кормопроизводстве, описана система радиологического мониторинга загрязнения кормов. Показано, что динамика изменения содержания ^{137}Cs в кормах во многом определялась регулярностью и особенностями проведения агротехнических реабилитационных мероприятий. Эффективные периоды полуснижения содержания ^{137}Cs в кормах в первый период после аварии (1987–1990 гг.) варьировали в пределах от 0,57 до 2,7 лет. В последующем (1991–2021 гг.) снижение загрязнения кормов замедлилось, а периоды полуснижения варьировали от 8,0 до 50 лет и более в зависимости от объемов реабилитационных работ и особенностей растений, используемых для производства кормов.

Ключевые слова: Чернобыльская АЭС, корма сельскохозяйственных животных, юго-западные районы Брянской области, мониторинг в сельском хозяйстве, ^{137}Cs .

Введение

Загрязнение сельскохозяйственных угодий после аварии на Чернобыльской АЭС привело к повышенному облучению населения, проживающего на территориях, подвергшихся воздействию [1–7]. При этом значительный вклад в формирование дозовых нагрузок на население вносят продукты животного происхождения и, в первую очередь, молоко [1, 4–6].

Для смягчения последствий Чернобыльской аварии в районах, подвергшихся радиоактивному загрязнению, в первую очередь в юго-западных районах Брянской области, потребовалось крупномасштабное проведение защитных и реабилитационных мероприятий [1, 7–10]. В их основе лежали данные радиоэкологического мониторинга, организованного службами Минсельхоза (Центром агрохимрадиологии «Брянский» и Брянской межобластной ветеринарной лабораторией) [10–13]. Поскольку содержание радионуклидов в продуктах животноводства определяется поступлением радионуклидов в организм животных с кормами, то мониторинг содержания ^{137}Cs в кормах имел важное значение при формировании приоритетов этих мероприятий [1, 6–9]. Проведение мониторинга в течение 35 лет после Чернобыльской аварии обеспечило выявление сельскохозяйственной продукции, не соответствующей допустимым

уровням [1, 14]. Это позволило организовать ее переработку и избежать неоправданных потерь этой продукции. Использование этих данных также имеет важное значение для обоснования перехода к условиям нормальной жизнедеятельности в пострадавших регионах [1, 2]. Анализ динамики содержания ^{137}Cs в сельскохозяйственной продукции с 1986 по 1994 г., а также с 2010 по 2020 г. представлен в ряде публикаций [15–18], однако данные за весь промежуток времени, прошедший после аварии, обобщались недостаточно. Это ограничивает использование результатов мониторинга, проводимого организациями Минсельхоза России, для решения задач, связанных с обоснованием перехода населения, проживающего на загрязненных территориях, к условиям нормальной жизнедеятельности и оценки последствий других потенциально возможных аварий [1, 2].

В первой публикации цикла [19] представлены данные по содержанию ^{137}Cs в продукции растениеводства, в то время как настоящая статья описывает динамику содержания ^{137}Cs в кормах животных. Ожидается, что данные по концентрациям ^{137}Cs в продукции животноводства будут представлены в последующих публикациях.

Для облегчения сравнения закономерностей изменения содержания ^{137}Cs в различных видах сельскохозяйственной продукции все статьи, посвященные этой теме,

Фесенко Сергей Викторович

Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии

Адрес для переписки: 249032 Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Россия; E-mail: Corwin_17F@mail.ru

имеют близкую структуру и аналогичное представление полученных результатов.

Цель исследования – анализ данных радиоэкологического мониторинга содержания ^{137}Cs в кормах, получаемых в юго-западных районах Брянской области, подвергшихся загрязнению после аварии на Чернобыльской АЭС.

Задачи исследования

1. Обобщение данных по концентрациям ^{137}Cs в кормах сельскохозяйственных животных, полученных организациями Минсельхоза России.

2. Оценка периодов полуснижения содержания ^{137}Cs в вышеперечисленной продукции в различные временные интервалы после аварии.

3. Оценка роли факторов, определяющих динамику снижения содержания ^{137}Cs в кормах сельскохозяйственных животных на протяжении 35 лет после аварии на Чернобыльской АЭС.

Исходные данные

Для анализа закономерностей изменения содержания ^{137}Cs в кормах сельскохозяйственных животных использовались данные радиоэкологического мониторинга, организованного Центром агрохимрадиологии «Брянский» и областной ветеринарной радиологической лабораторией в 7 юго-западных районах Брянской области: Гордеевском, Злынковском, Климовском, Клинцовском, Красногорском, Новозыбковском и Стародубском [1, 10–11, 18–20]. К основным видам кормов, входящих в рацион питания животных, относят грубые корма (сено, солома, мякина), сочные корма (силос, сенаж), зелёные корма (травы естественные, сеяные и др.). В состав рационов животных также входят концентраты, корнеплоды, мел, поваренная соль с микроэлементами, витамины А и D₂.

а также барда и жом свекловичный, но вклад этих компонентов в поступление ^{137}Cs в рацион является достаточно низким [1, 14]. В рамках мониторинга проводился отбор проб всех основных видов кормов. Динамика объемов проведения мониторинга кормов показана на рисунке 1, а основные характеристики пострадавших районов и данные, использованные при проведении настоящих исследований, приведены в таблице 1.

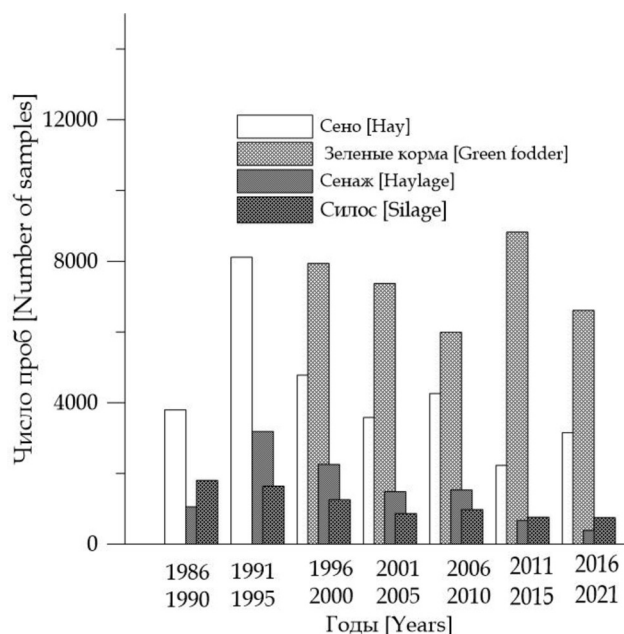


Рис. 1. Объемы отбора проб кормов для сельскохозяйственных животных в юго-западных районах Брянской области в 1986–2021 гг.

[Fig. 1. Quantity of feedstuffs samples taken annually in southwestern districts of Bryansk region in 1986–2021]

Характеристики загрязненных районов и количество данных, использованных для анализа

Таблица 1

[Table 1]

Characteristics of contaminated areas and quantity of data used for evaluations

Районы [Districts]	Плотность загрязнения ¹ , кБк/м ² [Contamination density ¹ , kBq/m ²]			Площадь, км ² [Area, km ²]	Сено [hay]	Сенаж [haylage]	Силос [silage]	Зеленый корм [Green forage]	Всего [Total]
	Сенокосы [Haylands]	Пастбища [Pastures]	Пашня [arable lands]						
Гордеевский [Gordeyevsky]	546 (409) ²	601 (421)	366 (210)	327	5459	3434	723	3980	13596
Злынковский [Zlunkovsky]	745 (544)	589 (486)	361 (333)	253	2166	406	812	2387	5771
Климовский [Klimovsky]	259 (188)	273 (188)	156 (93)	779	4296	1567	1542	1720	9125
Клинцовский [Klintsovsky]	393 (431)	442 (455)	232 (179)	444	4039	1145	1136	2640	8960
Красногорский [Krasnogorsky]	590 (586)	525 (655)	320 (313)	424	3070	1416	778	2339	7603
Новозыбковский [Novozybkovsky]	1011 (646)	884 (596)	526 (318)	391	6845	2375	2426	21583	33229
Стародубский [Starodubsky]	85	73	47	918	4822	316	820	3590	9548
Всего [Total]	–	–	–	3536	30697	10695	8237	38239	87832

¹Плотность выпадений дана на май 1986 г. [¹Fallout density is given for May 1986]

²В скобках дано среднее квадратичное отклонение [²The standard deviations are given in the brackets]

Наиболее высокие плотности загрязнения ^{137}Cs сенокосов и пастбищ (свыше 1000 кБк/м²) отмечены в Новозыбковском, Красногорском и Злынковском районах. Достаточно высокими были плотности загрязнения кормовых угодий (около 500 кБк/м²) в Клиновском и Гордеевском районах Брянской области. Существенно меньшие уровни загрязнения сенокосов и пастбищ характерны для Климовского района, а наименьшие уровни загрязнения почв кормовых угодий (менее 100 кБк/м²) отмечены для Стародубского района. Объем мониторинга в этих районах в целом соответствовал как плотности загрязнения сельскохозяйственных угодий, так и объемам производимой продукции. Для анализа динамики загрязнения кормов использовалось более 30 тысяч значений концентрации ^{137}Cs в сене, более 10 тысяч в сенаже, более 8 тысяч в силосе и более 38 тысяч в зеленых кормах. Данные, представленные в таблице 1, отражают результаты систематического отбора проб, проведенного в 177 хозяйствах с плотностью загрязнения кормовых угодий от 17 до 3800 кБк/м². Из этих хозяйств в 55 плотность загрязнения сенокосов на 1986 г. была меньше 185 кБк/м², в 46 плотность загрязнения сенокосов превышала 555 кБк/м², а в 76 хозяйствах плотность загрязнения была в диапазоне между 185 и 555 кБк/м².

Мониторинг также проводился на отчужденных сельскохозяйственных угодьях, включая хозяйства «им. 24 Партсъезда» и «им. Кирова» Красногорского района со средней плотностью загрязнения сенокосов на 1986 г. более 3000 кБк/м², «им. 22 Партсъезда», «Красная Ипуть», «Родина» и «Комсомолец» Новозыбковского рай-

она с плотностью выпадений на 1986 г. – 2560, 1740, 1710 и 1590 кБк/м² соответственно.

Из данных, представленных на рисунке 1, видно, что динамика объемов мониторинга различных видов кормов существенно отличалась. Мониторинг содержания ^{137}Cs в сене проводился в максимальных масштабах в 1991–1995 гг. Начиная с 1996 г., объемы проведения мониторинга сена примерно в 2 раза снизились, оставаясь на этом уровне до настоящего времени. В этот период резко увеличились объемы контроля зеленой массы естественных и многолетних трав, которые служат исходным сырьем для производства сена и сенажа, что позволило компенсировать уменьшение интенсивности мониторинга сена.

Существенно отличались и объемы проведения мониторинга в различных районах Брянской области. В максимальных объемах мониторинг проводился в хозяйствах Новозыбковского района, высокой была интенсивность мониторинга в хозяйствах Гордеевского, Злынковского, Клиновского и Красногорского районов, тогда как в хозяйствах и населенных пунктах Климовского и Стародубского районов отбор проб выполнялся в более ограниченных масштабах. В настоящее время проведение мониторинга в Климовском и Стародубском районах практически прекращено.

Для контроля загрязнения продукции животноводства, начиная с 1993 г., были введены контрольные уровни (Ку) на содержание ^{137}Cs в кормах (табл. 2) [14]. Значения этих уровней устанавливалось таким образом, чтобы гарантировать отсутствие превышения временно допусти-

Таблица 2

Временные допустимые уровни содержания ^{137}Cs (ВДУ), гигиенические требования к безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов (СанПиН) и контрольные уровни содержания этого радионуклида в кормах [14, 20]

[Table 2]

Temporary permissible levels of ^{137}Cs (TPL), hygienic requirements for food safety and nutritional value (SanPiN) and control levels (Cl) of this radionuclide in feedstuffs [14, 20]

Документ [Document]	ВДУ-91 [TPL 91]	ВДУ-93 [TPL 93]	СанПиН 2.3.2.560-96 [SanPiN 2.3.2.560-96]	СанПиН 2.3.2.1078-01 [SanPiN 2.3.2.1078-01]	СанПиН 2.3.2.2650-10 [SanPiN 2.3.2.2650-10]
Допустимые уровни содержания ^{137}Cs в пищевых продуктах [Permissible levels of ^{137}Cs in food]					
Молоко [Milk]	370	370	50,0	100,0	100
Мясо (говядина) [Beef]	740	600	160,0	160,0	200,0
Годы действия [Years in effects]	1991–1993	1993–1996	1996–2001	2001–2010	2010 – настоящее время
Контрольные уровни содержания ^{137}Cs в кормах [Control levels of ^{137}Cs in feed]					
Документ [Document]	Ку-94 (Cl-94)		ВП 13.5.13/06-01 [VR 13.5.13/06-01]		
Сено [Hay]	600		400,0		
Солома [Straw]	600		400,0		
Силос [Silage]	600		80,0		
Сенаж [Haylage]	600		80,0		
Зелёные корма [Green feeds]	370		100,0		
Корнеплоды [Beetroots]	600		60,0		
Концентрированные корма [Concentrates]	600		200,0		

мых уровней (ВДУ-91¹ и ВДУ-93²) содержания радионуклидов в пищевых продуктах и мотивировать снижение этих нормативов до возможно низкого уровня [20]. В последующем были введены постоянные гигиенические требования к качеству и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов³, СанПиН 2.3.2.560-96. (с доп. и изм. №18 – СанПиН 2.3.2.2650-10)⁴. В случае превышения контрольных уровней допускалось использование этих кормов для кормления рабочего скота и на ранней стадии откорма животных на мясо.

Для обеспечения гигиенических требований к безопасности пищевых продуктов в 2001 г. контрольные уровни содержания ¹³⁷Cs в кормах были изменены, и введены в действие новые нормативы на допустимые концентрации ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs в кормах [14]. К сожалению, в том же году Ветеринарные правила ВП 13.5.13/06-01 были отменены, и в настоящее время единственным документом, устанавливающим контрольные уровни допустимого содержания ¹³⁷Cs в кормах, остаются уровни, введенные в 1994 г. [14]. Таким образом, в настоящее время отсутствует система нормативов, определяющая допустимые концентрации радионуклидов в кормах животных. Это существенно влияет на обоснование решений, направленных на проведение реабилитации сельскохозяйственных угодий на основе данных мониторинга радиоактивного загрязнения кормов, а «допустимые» уровни содержания ¹³⁷Cs не гарантируют получение молока и мяса с содержанием радионуклидов, удовлетворяющим требованиям СанПиН 2.3.2.1078-01 (с доп. и изм. № 18 – СанПиН 2.3.2.2650-10).

Отсутствие современных нормативов, определяющих допустимые концентрации радионуклидов в кормах животных, является пробелом в российском регулировании, касающемся радиационной безопасности, и осложняет переход к нормальной жизнедеятельности в регионах, пострадавших после аварии на Чернобыльской АЭС.

При анализе закономерностей динамики содержания радионуклидов в сельскохозяйственной продукции учитывалось влияние защитных и реабилитационных мероприятий [1]. На протяжении всего периода времени, прошедшего после Чернобыльской аварии, к основным мероприятиям в области кормопроизводства относились коренное и поверхностное улучшение лугов и пастбищ, которые особенно широко применялись в первые годы после Чернобыльской аварии (рис. 2). Обе эти технологии относятся к категории культуртехнических мер и проводятся на постоянной основе с целью поддержания продуктивности кормовых угодий [1, 11].

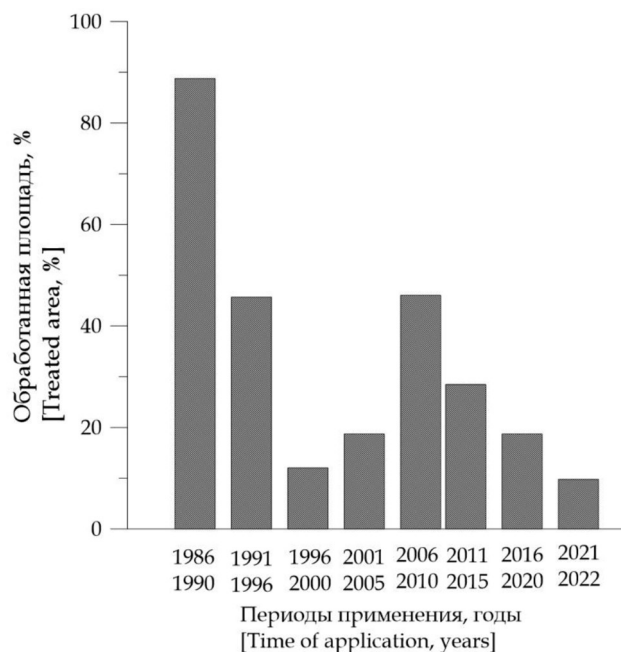


Рис. 2. Масштабы проведения коренного улучшения лугов и пастбищ после аварии на Чернобыльской АЭС [3, 8].
Процент обработанных площадей от общей площади угодий
[Fig. 2. Implementation of radical improvement at the meadows and pastures used for feedstuffs production [3, 8]. Percentage of cultivated areas of the total area of lands]

Культуртехнические мероприятия являются нормальной сельскохозяйственной практикой, которая для использования в загрязненных районах была дополнена элементами, обеспечивающими максимальное снижение поступления радионуклидов из почвы в растения [1, 5]. Снижение объемов проведения или прекращения этих мероприятий может привести к увеличению поступления в растительность и уменьшению продуктивности сенокосов и пастбищ [1].

Поверхностное улучшение включает поверхностную агротехническую обработку почвы и дернины посредством фрезерования или дискования, а при проведении коренного улучшения дополнительно используется вспашка почвы на глубину 20–25 см. В дальнейшем работы ведутся по принятым технологиям для данной почвенно-климатической зоны и включают в себя внесение удобрений, применение мелиорантов, подбор травосмесей. Эти мероприятия сохраняют эффективность в течение

¹ Временные допустимые уровни содержания цезия-137 и стронция-90 в пищевых продуктах и питьевой воде, устанавливаемые в связи с аварией на Чернобыльской АЭС (ВДУ-91). М.: Минздрав СССР, 1991. [VDU 91. Temporary Permissible Levels of Cesium-137 and Strontium-90 in Food and Drinking Water Established in Connection with the Chernobyl Accident (TPL-91). Moscow: Ministry of Health of the USSR, 1991. (In Russ.).]

² ВДУ-93. Временные допустимые уровни содержания радионуклидов цезия-134, -137 и стронция-90 в пищевых продуктах. М.: Минздрав РФ, 1993. [VDU 93. Temporary Permissible Levels of Cesium-134, -137 and Strontium-90 Radionuclides Content in Food Products. Moscow: Ministry of Health of the RF, 1993. (In Russ.).]

³ Гигиенические требования к качеству и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов. Санитарные правила и нормы. СанПиН 2.3.2.560-96. М., 1997. [Hygienic Requirements to Quality and Safety of Food Raw Materials and Food Products. Sanitary Rules and Norms. SanPiN 2.3.2.560-96. M. 1997 (In Russ.).]

⁴ Дополнения и изменения № 18 к санитарно-эпидемиологическим правилам и нормативам СанПиН 2.3.2.1078-01. [Supplements and Amendments #18 to SanPiN 2.3.2.1078-01 Sanitary and Epidemiological Rules and Standards (In Russ.).]

ние 4–6 лет после начала использования обработанного поля. Таким образом, их применение является одним из основных механизмов реабилитации загрязненных территорий [1, 5].

Максимальная эффективность этих мероприятий наблюдается при первом применении, достигая 10 и более раз⁵ и особенно высоких значений на влажных лугах. При повторном использовании их эффективность ниже и обычно не превышает 3 раз в зависимости от использованной технологии и характеристик луга [1, 7]. В то же время их проведение ограничивает использование лугов и пастбищ, на которых оно проведено в течение 1–1,5 лет после внедрения, так как выпас животных или использование сельскохозяйственной техники для сенокошения могут повредить растения, корневая система которых в первый период после проведения работ еще не укоренилась и чувствительна к воздействиям такого рода.

После Чернобыльской аварии коренное и поверхностное улучшение проводилось на максимальной площади, где это было возможно, с учетом потребностей в организации кормовой базы. В этом заключается существенное отличие реабилитации кормовых угодий от мероприятий на пахотных землях, где внесение калийных и фосфорных удобрений было возможно на всей территории, подвергшейся загрязнению, а использование полей было возможно в год их применения.

Максимальные уровни применения мероприятий отмечались в первые 5–7 лет после аварии, и к 1991 г. практически все доступные кормовые угодья в юго-западных районах Брянской области были охвачены этими мероприятиями [5–8]. В 1996–2000 гг. проведение этих мероприятий было минимальным и не соответствовало потребности в окультуривании сельскохозяйственных угодий. Впоследствии в рамках федеральной национальной программы (ФЦП) «Сохранение и восстановление плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения и агроландшафтов как национального достояния России на 2006–2013 годы» в 2006–2013 гг. работы по реабилитации загрязненных территорий

проводились в достаточно больших объемах, что повлияло в этот период на динамику загрязнения как продукции растениеводства, так и продукции кормопроизводства [1, 19].

Планирование мероприятий основывалось на оценке уровня достигнутого радиационного благополучия в сфере агропромышленного комплекса и значительно отличалось от района к району (табл. 3). Важным фактором, определяющим объемы проведения мероприятий в отдаленный период после Чернобыльской аварии, являлось и то, что в регионе, в частности, в Климовском и Стародубском районах, появились крупные агрохолдинги, которые финансировали улучшение сенокосов и пастбищ, использующихся для производства кормов для сельскохозяйственных животных.

Так же, как и в первой статье настоящего цикла [19], для статистического анализа данных применялся подход, приведенный в публикации [21].

Концентрации ^{137}Cs в кормах в первый год после выпадений

Данные по концентрациям ^{137}Cs в рассматриваемых видах кормов в 1986 г. приведены в таблице 4.

Количество измерений составило 1193 пробы сена, 68 проб сенажа и 352 пробы силоса. Вариабельность концентраций в отдельных пробах составила от $2,0 \times 10^2$ до $2,5 \times 10^5$ Бк кг⁻¹ для сена, от 74 до $4,7 \times 10^4$ Бк кг⁻¹ для сенажа и от 3,7 до $2,4 \times 10^3$ Бк кг⁻¹ для силоса. Наибольшие уровни содержания ^{137}Cs в сене (более 20,000 Бк кг⁻¹) отмечены в Новозыбковском, Злынковском и Красногорском районах, примерно в 2 раза меньшие уровни содержания ^{137}Cs в сене отмечены в Клиновском и Гордеевском районах, а минимальные – в Климовском районе. При этом следует отметить наличие зависимости загрязнения сена от плотности выпадений. Средние концентрации ^{137}Cs в сене ($Q(\sigma)$, Бк/кг) достаточно хорошо описываются простым уравнением:

$$Q(\sigma) = 26,3 \times \sigma, R^2 = 0,71$$

где σ – плотность выпадений в 1986 г., кБк/м².

Таблица 3
Объемы проведения реабилитационных мероприятий в юго-западных районах Брянской области в отдаленный период после Чернобыльской аварии в процентах от площади сенокосов и пастбищ

Implementation of remedial options in the southwestern districts of the Bryansk region in the long-term after the Chernobyl accident as a percentage of the area of hayfields and pastures [Table 3]

Районы	Годы [Years]						Всего за 2016–2021 гг. [Total, 2016–2021]
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
Гордеевский [Gordeyevsky]	2	2	2	1			7
Злынковский [Zlunkovsky]	6	10	10	13	14	1	54
Климовский [Klimovsky]	4	0	0	5	11	26	47
Клинцовский [Klintsovsky]	8	6	4	2	1		20
Красногорский [Krasnogorsky]	1	2	4	4	5	9	26
Новозыбковский [Novozybkovsky]	1	2	1	1		2	8
Стародубский [Starodubsky]	1	4	4	4	6	3	22
Гордеевский [Gordeyevsky]	3	3	3	3	4	6	23

⁵ По критерию снижения коэффициентов перехода ^{137}Cs в растения.

Таблица 4

Параметры распределения концентраций ^{137}Cs в пробах кормов, отобранных в юго-западных районах
Брянской области в 1986 г., Бк/кг

[Table 4]

Parameters of distribution of ^{137}Cs concentrations in samples of feedstuffs taken in southwestern districts
of Bryansk region in 1986, Bq/kg

Районы [Districts]	N ¹	Среднее [Mean]	Стандартное отклонение [St. Dev]	Геометрическое среднее [G. Mean]	Медиана [Median]	Мин. [Min]	Мак. [Max]
Сено [Hay]							
Гордеевский [Gordeyevsky]	12	$1,1 \times 10^4$	$1,2 \times 10^4$	$7,6 \times 10^3$	$7,4 \times 10^3$	$3,5 \times 10^3$	$4,7 \times 10^4$
Злынковский [Zlunkovsky]	7	$2,0 \times 10^4$	$1,1 \times 10^4$	$1,6 \times 10^4$	$2,1 \times 10^4$	$1,9 \times 10^3$	$4,1 \times 10^4$
Климовский [Klimovsky]	14	$7,9 \times 10^3$	$5,0 \times 10^3$	$4,4 \times 10^3$	$6,1 \times 10^3$	$2,6 \times 10^3$	$2,2 \times 10^4$
Клинцовский [Klintsovsky]	17	$1,1 \times 10^4$	$8,5 \times 10^3$	$8,6 \times 10^3$	$6,7 \times 10^3$	$2,7 \times 10^3$	$3,5 \times 10^4$
Красногорский [Krasnogorsky]	16	$2,2 \times 10^4$	$6,0 \times 10^3$	$2,2 \times 10^4$	$2,2 \times 10^4$	$1,5 \times 10^4$	$3,3 \times 10^4$
Новozyбковский [Novozybkovsky]	12	$2,3 \times 10^4$	$6,6 \times 10^3$	$2,3 \times 10^4$	$2,2 \times 10^4$	$1,7 \times 10^4$	$4,2 \times 10^4$
По 6 районам [For 6 districts]	78	$1,6 \times 10^4$	$1,0 \times 10^4$	$1,2 \times 10^4$	$1,6 \times 10^4$	$2,6 \times 10^3$	$4,7 \times 10^4$
Сенаж [Haylage]							
Злынковский [Zlunkovsky]	8	$1,4 \times 10^4$	$9,8 \times 10^3$	$1,0 \times 10^4$	$1,1 \times 10^4$	$1,9 \times 10^3$	$3,4 \times 10^4$
Климовский [Klimovsky]	10	5476	$8,3 \times 10^3$	$3,9 \times 10^3$	$3,7 \times 10^3$	$9,0 \times 10^2$	$2,8 \times 10^4$
Новozyбковский [Novozybkovsky]	13	$7,6 \times 10^3$	$8,0 \times 10^3$	$2,9 \times 10^3$	$2,7 \times 10^3$	74	$2,4 \times 10^4$
По 3 районам [For 3 districts]	31	$8,5 \times 10^3$	$9,1 \times 10^3$	$4,7 \times 10^3$	$3,9 \times 10^3$	74	$3,4 \times 10^4$
Силос [Silage]							
Гордеевский [Gordeyevsky]	11	$2,4 \times 10^3$	$3,2 \times 10^3$	$1,2 \times 10^3$	$5,8 \times 10^2$	370	$1,1 \times 10^4$
Злынковский [Zlunkovsky]	9	$1,8 \times 10^3$	$4,5 \times 10^3$	$3,7 \times 10^2$	$3,0 \times 10^2$	37	$1,4 \times 10^4$
Климовский [Klimovsky]	20	$4,0 \times 10^2$	$3,4 \times 10^2$	$3,2 \times 10^2$	$2,9 \times 10^2$	74	$1,7 \times 10^3$
Клинцовский [Klintsovsky]	16	$6,0 \times 10^2$	$6,2 \times 10^2$	$3,7 \times 10^2$	$2,8 \times 10^2$	37	$3,4 \times 10^3$
Красногорский [Krasnogorsky]	14	$2,4 \times 10^3$	$3,8 \times 10^2$	$2,3 \times 10^3$	$2,4 \times 10^3$	$1,7 \times 10^3$	$2,8 \times 10^3$
Новozyбковский [Novozybkovsky]	14	$9,1 \times 10^2$	$5,9 \times 10^2$	$2,3 \times 10^2$	$1,5 \times 10^2$	37	$2,1 \times 10^3$
По 6 районам [For 6 districts]	68	$1,3 \times 10^3$	$2,2 \times 10^3$	$5,7 \times 10^2$	$4,5 \times 10^2$	37	$1,4 \times 10^4$

¹ Число обследованных хозяйств [Number of investigated farms].

Для силоса, так же, как и основных видов продукции растениеводства [14], не отмечено явной зависимости содержания ^{137}Cs в растениях от плотности выпадений, что объясняется проведением защитных мероприятий в 1986 г. Кроме того, следует учитывать, что авария на Чернобыльской АЭС произошла после высева семян кукурузы на силос. Вследствие этого корневое поступление в растения было возможно только из верхнего горизонта почвы, а вклад аэрального загрязнения был

незначительным вследствие недостаточного развития биомассы.

Среднее значение содержания ^{137}Cs в сене юго-западных районов Брянской области было примерно в 10 раз больше, чем в силосе, и почти в два раза больше, чем в сенаже. Эти отношения значительно варьируют в зависимости от района и меняются от 4,5 (Гордеевский район) для до 26 (Новozyбковский район) для силоса и от 1,4 (Климовский район) до 3,2 (Новozyбковский район) для сенажа.

Динамика содержания ^{137}Cs в продукции растениеводства

Данные по динамике изменения концентраций ^{137}Cs в сене, сенаже, силосе и зеленых кормах представлены на рисунках 3–6. Из приведенных данных (см. рис. 3–6) видно, что за период времени с 1987 до 2021 г. содержание ^{137}Cs в кормах уменьшилось от 100 раз в силосе до 260 раз в сенаже. Вклад радиоактивного распада в снижение загрязнения продукции был незначителен (менее 1%) по сравнению с вкладом в снижение загрязнения продукции применения защитных и реабилитационных мероприятий, а также с вкладом природных геохимических процессов, определяющих необменную сорбцию цезия в почвенно-поглощающем комплексе почвы.

Динамика снижения концентраций ^{137}Cs как в сене, так и в сенаже, силосе и зеленых кормах носила неравномерный характер и отличалась в различные периоды времени после аварии. Качественный анализ этих данных позволяет в многих случаях выделить 4 периода времени ($T^1_{1/2}$, $T^2_{1/2}$, $T^3_{1/2}$ и $T^4_{1/2}$), в течение которых интенсивность снижения ^{137}Cs в кормах существенно отличалась, а именно первый период после аварии (с 1987 до 1993 г.), восстановительный период (с 1994 по 2006 г.), третий (с 2007 по 2015 г.) – период активного внедрения ФЦП и последствия от применения реабилитационных мероприятий. В качестве четвертого периода времени (с 2016 по 2021 г.) можно рассматривать отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС. Верхний индекс, указанный в периодах полуснижения на рисунках 3–6, соответ-

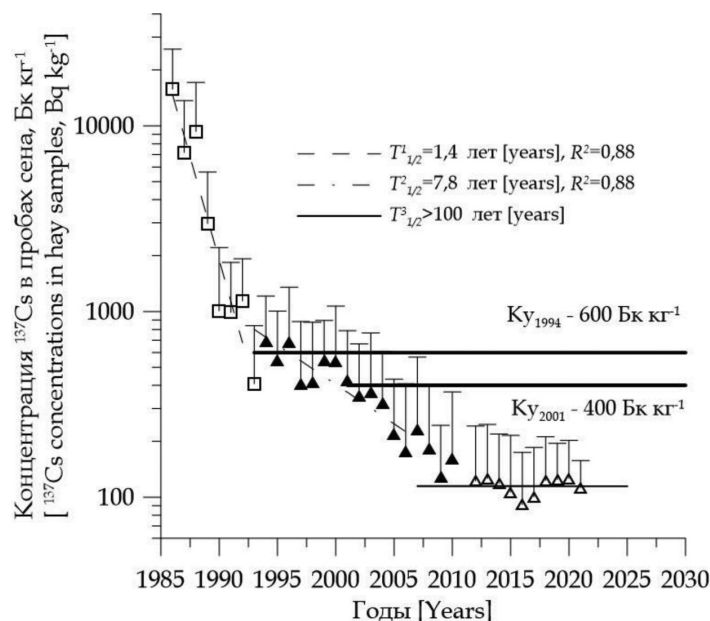


Рис. 3. Динамика снижения концентрации ^{137}Cs в сене юго-западных районов Брянской области после аварии на Чернобыльской АЭС

[Fig. 3. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in hay produced in southwestern districts of Bryansk region after the Chernobyl accident]

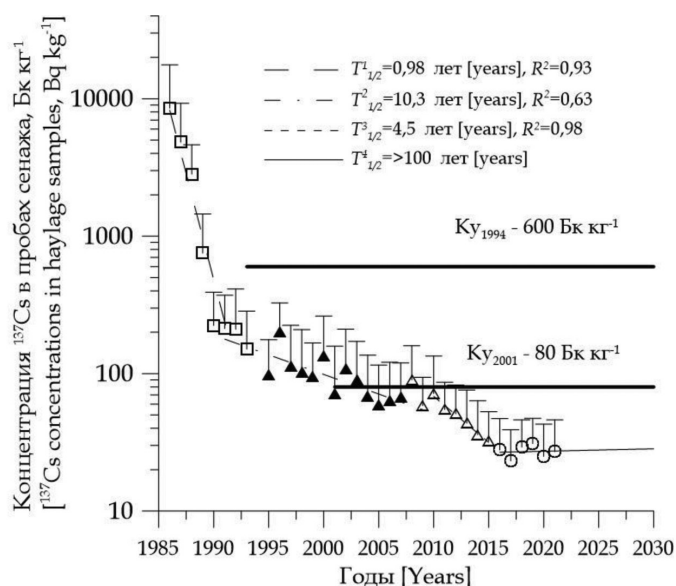


Рис. 4. Динамика снижения содержания ^{137}Cs в сенаже, производимом в юго-западных районах Брянской области, после аварии на Чернобыльской АЭС

[Fig. 4. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in haylage produced in southwestern districts of Bryansk region after the Chernobyl accident]

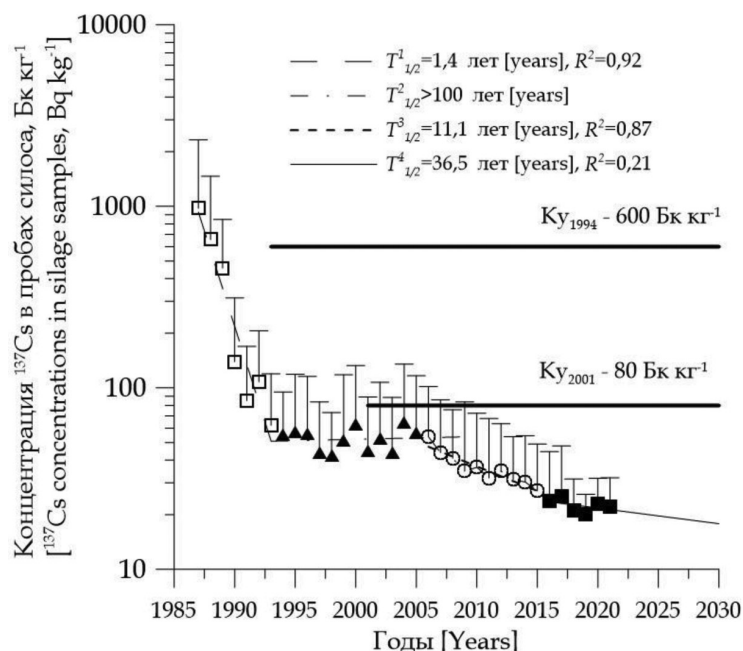


Рис. 5. Динамика снижения содержания ^{137}Cs в силосе, производимых в юго-западных районах Брянской области, после аварии на Чернобыльской АЭС

[Fig. 5. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in silage produced in southwestern districts of Bryansk region after the Chernobyl accident]

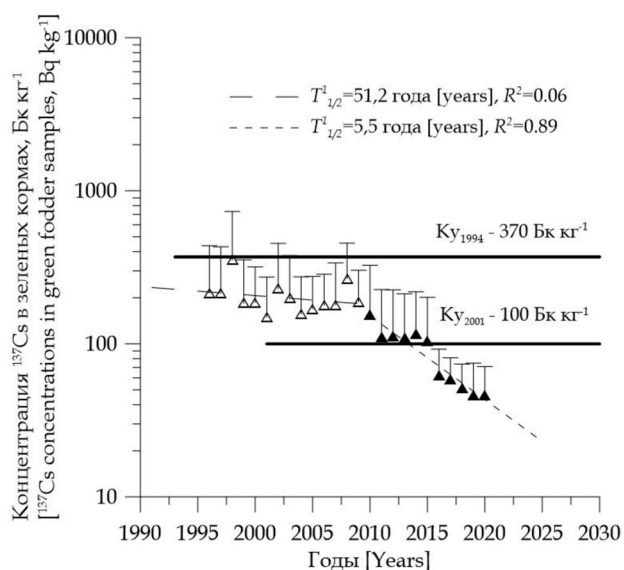


Рис. 6. Динамика снижения содержания ^{137}Cs в зеленых кормах, производимых в юго-западных районах Брянской области после аварии на Чернобыльской АЭС. Данные, соответствующие выделенным периодам после аварии, представлены разными символами

[Fig. 6. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in green fodder produced in southwestern districts of Bryansk region after the Chernobyl accident. Data corresponding to different periods after the accident are represented by different symbols]

ствует номеру периода. Периоды наблюдений для зеленых кормов включали только 2 временных интервала, в пределах которых периоды полуснижения отличались.

Активное применение этих мероприятий, включающих известкование кислых почв и внесение повышенных доз минеральных удобрений, способствовало быстрому снижению загрязнения кормов в период времени с 1987 до 1991 г. По сравнению с агрохимическими мероприятиями на пахотных угодьях, культуртехнические мероприятия обладают пролонгированным эффектом, поэтому существенное снижение содержания ^{137}Cs в кормах от-

мечалось практически до середины 1990-х гг. Для этого периода времени после Чернобыльской аварии характерны самые короткие периоды полуснижения содержания радионуклида в продукции – от 0,98 (сенаж) до 1,4 года (сено, силос).

В первой половине 1990-х гг. (второй период) возможности в проведении реабилитации сельскохозяйственных угодий резко сократились и объемы применения мероприятий не соответствовали требуемой практике окультуривания сенокосов и пастбищ (см. рис. 2) [1, 5]. Кроме того, повторное проведение коренного улучшения лугов

характеризуется существенно меньшей эффективностью по критерию снижения накопления ^{137}Cs растениями. Это также привело к замедлению темпов снижения поступления радионуклидов в растения. Следует отметить отличия в темпах снижения содержания ^{137}Cs в сене, сенаже, для которых эти периоды, рассчитанные для 1993–2006 гг., составили 8–10 лет, и в силосе, для которого период полуснижения превысил 50 лет. Это означает, что прекращение или сильное сокращение проведения мероприятий физически приводило к увеличению поступления ^{137}Cs в растения, которое не могло быть компенсировано радиоактивным распадом.

Внедрение мероприятий ФЦП (третий период: 2007–2016 гг.), обеспечивших кратное увеличение объемов проведения мероприятий, позволило восстановить темпы снижения загрязнения продукции и нивелировать ухудшение плодородия почв. Периоды полуснижения составили от 4,5 до 10,8 года в зависимости от вида кормов и особенностей проведения реабилитационных мероприятий, характерных для данных видов кормов. Наиболее длительный период полуснижения отмечался для силоса, который является пропашной культурой. С учетом последствий мероприятий, эффект от их применения ощущался до 2015 г.

В последующем (четвертый период: 2016–2021 гг.) динамика снижения содержания ^{137}Cs в кормовых растениях определялась разнонаправленными процессами, то есть увеличением поступления ^{137}Cs в растения в результате снижения плодородия сенокосов и пастбищ (сено, сенаж и зеленые корма), а также пахотных почв (силос), которое компенсировалось естественным снижением

биологической доступности радионуклидов в почвах под действием геохимических процессов. Начиная с 2016 г., периоды полуснижения составляли для сена и сенажа более 50 лет, а для силоса – более 30 лет. Также можно отметить тенденцию к замедлению темпов уменьшения содержания радионуклидов и в зеленых кормах.

На протяжении всего периода после аварии наибольшие уровни содержания ^{137}Cs отмечались в сене, что связано как с особенностями его технологической заготовки (высушивание), так и с тем, что кукуруза на силос возделывается на пахотных угодьях. При этом до 2010 г. содержание ^{137}Cs во всех видах кормов могло превышать контрольные уровни 1993 г., рассчитанные, исходя из содержания ^{137}Cs в молоке 370 Бк л⁻¹. В этот период дальнейшее снижение радионуклидов в продукции животноводства обеспечивалось в основном применением ферроцинсодержащих препаратов. В результате внедрения мероприятий ФЦП удалось достичь снижения содержания ^{137}Cs в кормах до уровней, соответствующих требованиям контрольных уровней 2001 г., которые соответствовали требованиям СанПиН 2.3.2.1078-01. Одновременно это подтверждает обоснованность отмены контрольных уровней 2001 г., поскольку в период с 2001 по 2013 г. они были технически и экономически недостижимы.

Периоды полуснижения содержания ^{137}Cs в продукции растениеводства

Эффективные и экологические периоды полуснижения содержания ^{137}Cs в кормах приведены в таблице 5. Данные для 1986 г. анализировались отдельно, поскольку

Таблица 5

Эффективные периоды полуснижения содержания ^{137}Cs в пробах кормов, отобранных в юго-западных районах Брянской области в 1987–2021 гг.

[Table 5]

Effective half-lives of ^{137}Cs concentrations in feedstuffs samples taken in the southwestern districts of the Bryansk region in 1987–2021]

Районы [Districts]	$T'_{1/2}$ лет [years]	R^2	$T^2_{1/2}$ лет [years]	R^2	$T^3_{1/2}$ лет [years]	R^2
Сено [Hay]						
Гордеевский [Gordeyevsky]	2,1	0,98	18,2	0,56	23,1	0,25
Злынковский [Zlunkovsky]	1,0	0,92	21,7	0,54	25,7	0,21
Климовский [Klimovsky]	1,9	0,70	6,2	0,88	13,3	0,61
Клинцовский [Klintsovsky]	1,3	0,81	5,8	0,84	8,9	0,54
Красногорский [Krasnogorsky]	0,67	0,78	10,2	0,46	14,8	0,47
Новозыбковский [Novozybkovsky]	0,9	0,81	11,4	0,56	9,6	0,19
Стародубский [Starodubsky]	–	–	6,1 ¹	0,76	10,2	0,62
Сенаж [Haylage]						
Гордеевский [Gordeyevsky]	1,2	0,98	5,5	0,67	–	–
Злынковский [Zlunkovsky]	0,57	0,99	9,8	0,61	–	–
Климовский [Klimovsky]	0,71	0,86	11,4	0,70	–	–
Клинцовский [Klintsovsky]	2,8	0,72	11,5	0,45	>50	0,1
Красногорский [Krasnogorsky]	1,4	0,96	5,0	0,76	>50	0,01
Новозыбковский [Novozybkovsky]	0,58	0,99	18,4	0,21	>50	–
Стародубский [Starodubsky]			11,5 ¹	0,34	8,9	0,89

Районы [Districts]	$T'_{1/2}$ лет [years]	R^2	$T^2_{1/2}$ лет [years]	R^2	$T^3_{1/2}$ лет [years]	R^2
Силос [Silage]						
Гордеевский [Gordeyevsky]	1,9	0,89	5,1	0,89	>50	0,34
Злынковский [Zlunkovsky]	1,0	0,99	34,7	0,14	>50	0,24
Климовский [Klimovsky]	0,83	0,90	15,4	0,48	>50	–
Красногорский [Krasnogorsky]	1,73	0,99	4,4	0,93	>50	0,13
Новозыбковский [Novozybkovsky]	1,32	0,90	11,0	0,49	18,7	0,54
Стародубский [Starodubsky]			4,1 ¹	0,55	20,4	0,11
Зеленые корма [Green fodder]						
Гордеевский [Gordeyevsky]	–	–	>30,17 ²	0,37	>50	–
Злынковский [Zlunkovsky]	–	–	4,9 ²	0,95	>50	0,32
Климовский [Klimovsky]	–	–	34,7 ²	0,48	18,7	0,39
Клинцовский [Klintsovsky]	–	–	11,0 ³	0,73	>50	–
Красногорский [Krasnogorsky]	–	–	11,9 ²	0,64	>50	–
Новозыбковский [Novozybkovsky]	–	–	>30,17 ²	0,66	24,8	0,42

¹ Период полуснижения рассчитывался на основе данных с 1993 по 2011 г.; ² Период полуснижения рассчитывался на основе данных с 1996 по 2011 г.; ³ Период полуснижения рассчитывался на основе данных с 2008 по 2016 г. [¹the half-life was calculated based on data from 1993 to 2011]; [²the half-life was calculated based on data from 1996 to 2011]; [³the half-life was calculated based on data from 2008 to 2016]

загрязнение продукции кормопроизводства в год аварии определялось как аэральным, так и корневым поступлением. Интервалы времени, в течение которых проводился отбор проб, отличались как для отдельных районов, так и для отдельных видов кормов. Наиболее длинные ряды данных по содержанию ^{137}Cs в кормах (с 1987 по 2021 г.) были получены для сена и силоса, данные для сенажа для большей части районов находились в диапазоне времени с 1987 по 2007–2020 гг. Отбор проб зеленых кормов начали проводить со задержкой. В Гордеевском, Климовском, Красногорском и Новозыбковском районах отбор проб зеленых кормов был начат в 1996 г., а в Злынковском и Клинцовском районах – только после 2006 г.

Данные, представленные на рисунках 3–6, показывают, что динамика содержания ^{137}Cs в кормах носила неоднородный характер, а данные позволяют выделить несколько периодов времени, различия в пределах каждого из которых были довольно близки, а периоды полуснижения между которыми отличались. К такого рода периодам относятся интервалы времени с 1987 по 1993 г., с 1994 по 2006 г. и с 2007 по 2021 г.

Первый период охватывает промежуток времени, когда мероприятия применялись в максимально возможных масштабах, а площади сенокосов и пастбищ, охваченные этими мероприятиями, постоянно увеличивались.

Второй период включает промежуток времени, когда объемы проведения защитных мероприятий сократились, третий период включает промежуток времени, когда в некоторых районах сказывался эффект от проведения мероприятий в рамках ФЦП. В большинстве районов эффект от ранее проведенных мер был практически нивелирован, и снижение загрязнения продукции определялось главным образом естественным снижением биологической доступности ^{137}Cs в почве и радиоактивным распадом. Вторые периоды полуснижения (с 1996 по 2006 г.) находятся в диа-

пазоне от 5,8 до 46,2 лет, а третьи – от 8,9 года до более 50 лет. Данные таблицы 5 также показывают, что периоды полуснижения сильно варьируют между отдельными районами, отражая масштабы проведения мероприятий в этих районах. Кроме того, недостаточное количество информации, а также отличий в объеме мероприятий, проводимых в рамках ФЦП в отдельных районах, не позволили достоверно разделить 3-й и 4-й периоды, а данные приведены только для 3-го периода, объединяющего данные с 2007 по 2021 г. Для этого периода характерны более длинные значения $T_{1/2}$, превышающие во многих случаях 50 лет. Это означает, что концентрации ^{137}Cs в кормах находились примерно на одном уровне, а снижение содержания радионуклида в кормах вследствие радиоактивного распада и сорбции цезия в почве компенсировалось ростом перехода ^{137}Cs в кормовые растения в результате снижения эффективности контрмер. Вследствие этого оценка периодов полуснижения, превышающих 50 лет, требует наблюдений в течение промежутков времени, сопоставимых с радиоактивным распадом, а значения R^2 , оцененные для периодов полуснижения на основе существующих данных, составляют величины менее 0,1.

Первый период полуснижения содержания ^{137}Cs в сене (1987–1993 гг.) находится в диапазоне от 0,67 до 1,2 года, в сенаже и силосе – от 0,57 до 2,7 года, при значениях R^2 в пределах от 0,64 до 0,99. Отметим, что эти данные в целом согласуются с данными наблюдений в других регионах мира [22–24]. Более длинные периоды полуснижения содержания в кормах были характерны для Стародубского района, что связано с низкими уровнями загрязнения сенокосов и пастбищ и, как следствие, менее интенсивным проведением мероприятий.

Объемы проведения мероприятий даже на единицу площади кормовых угодий в отдельных районах сильно отличались (см. табл. 2). Это привело к существенным от-

личиям в динамике изменения содержания ^{137}Cs в кормах, производимых в различных районах, на протяжении всего периода времени после аварии на Чернобыльской АЭС (рис. 7). Таким образом для корректной интерпретации динамики изменения содержания ^{137}Cs в кормах и оценки трендов в ее изменении необходимо привлечение данных по проводимым мероприятиям и анализ информации по изменению концентраций ^{137}Cs в кормах на протяжении достаточно длинных рядов наблюдений. В качестве примера на рисунке 7 приведены данные по содержанию этого радионуклида в зеленых кормах (Новozyбковский район) и сене Гордеевского района Брянской области. Из приведенных данных (см. рис. 7А) видно, что в период с 1996⁶ по 2008 г. отмечалось медленное снижение содержания ^{137}Cs в зеленых кормах Новozyбковского района с периодом полуснижения 16,1 года.

В период проведения ФЦП было отмечено почти двукратное снижение и затем с 2013 по 2021 г. дальнейшее снижение с периодом 24,8 года. В то же время средний период полуснижения за все годы наблюдений составил 6,7 года. Очевидно, что использование этой величины для прогноза уровней загрязнения зеленых кормов и молока некорректно и может привести к большому занижению фактических уровней. Аналогичный вывод можно сделать и при оценке данных по содержанию ^{137}Cs в сене, производимом в Гордеевском районе (см. рис. 7В). Так, использование для прогноза данных с 1996 по 2011 г. приводит к занижению оценок, сделанных для периода времени после 2021 г., а использование средних данных с 1996 по 2021 г. приводит к завышению таких результатов.

Динамика снижения содержания ^{137}Cs в сене в зонах с различной плотностью загрязнения почв сельскохозяйственных угодий

Для оценки различий в динамике снижения ^{137}Cs в кормах в зонах с различным применением реабилитационных мероприятий имеющаяся информация была разделена на 3 группы, отличающихся по плотности загрязнения сенокосов и пастбищ: меньше 185 кБк/м², от 185 кБк/м² до 555 кБк/м² и более 555 кБк/м² (рис. 8).

Хозяйства, в которых плотность загрязнения кормовых угодий была менее 185 кБк/м², относятся к категории хозяйств, в которых проведение реабилитационных мероприятий не требовалось. В хозяйствах с плотностью загрязнения между 185 и 555 кБк/м² защитные и реабилитационные мероприятия носили ограниченный характер, хозяйства с плотностью загрязнения более 555 кБк/м² были отнесены к категории «критических» хозяйств, проведение мероприятий в которых рассматривалось как приоритетная задача.

Из данных, представленных на рисунке 8, видно, что динамика снижения содержания ^{137}Cs в сене в хозяйствах с различной плотностью загрязнения кормовых угодий отличалась. Так, после периода быстрого снижения концентраций радионуклидов в сене темпы снижения загрязнения в сене замедлились. При этом динамика снижения ^{137}Cs в сене в зонах с плотностью выпадений менее 185 кБк/м² и плотностью выпадений между 185 и 555 кБк/м² была довольно близка, а снижение загрязнения сена в зоне с плотностью загрязнения сенокосов более 555 кБк/м² происходило в первый период после аварии быстрее.

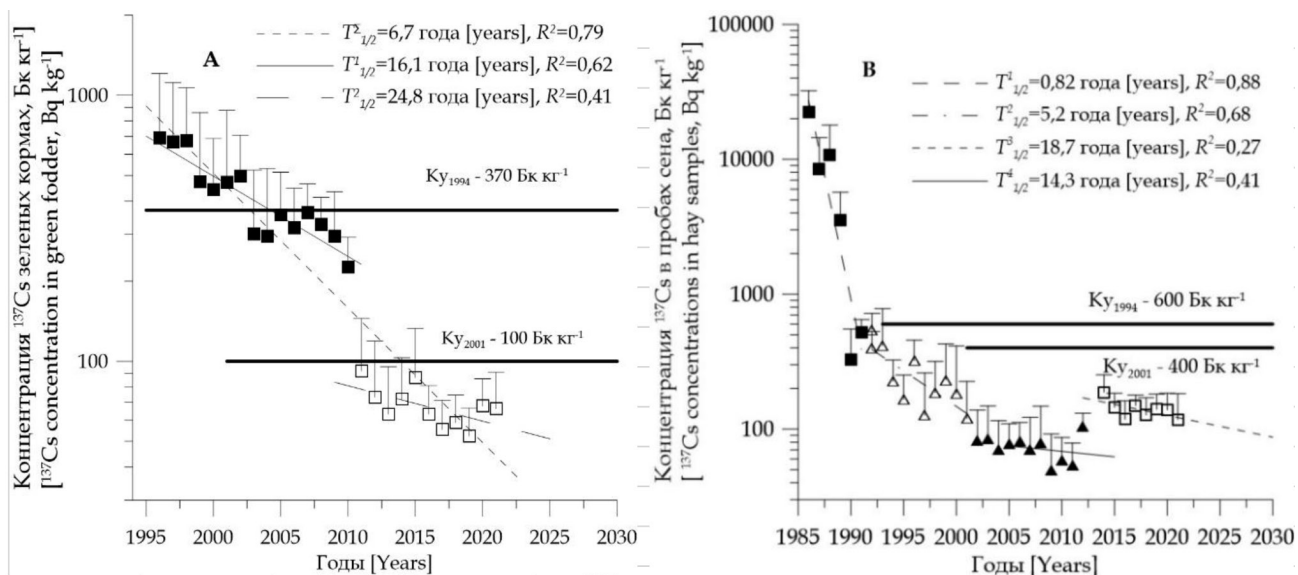


Рис. 7. Динамика снижения содержания ^{137}Cs в зеленых кормах Новozyбковского (А) и сене Гордеевского (В) районов Брянской области

[Fig. 7. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in green fodder produced in Novozybkovsky (A) and hay of Gordeyevsky (B) districts of the Bryansk region]

⁶ Начало мониторинга содержания ^{137}Cs в зеленых кормах.

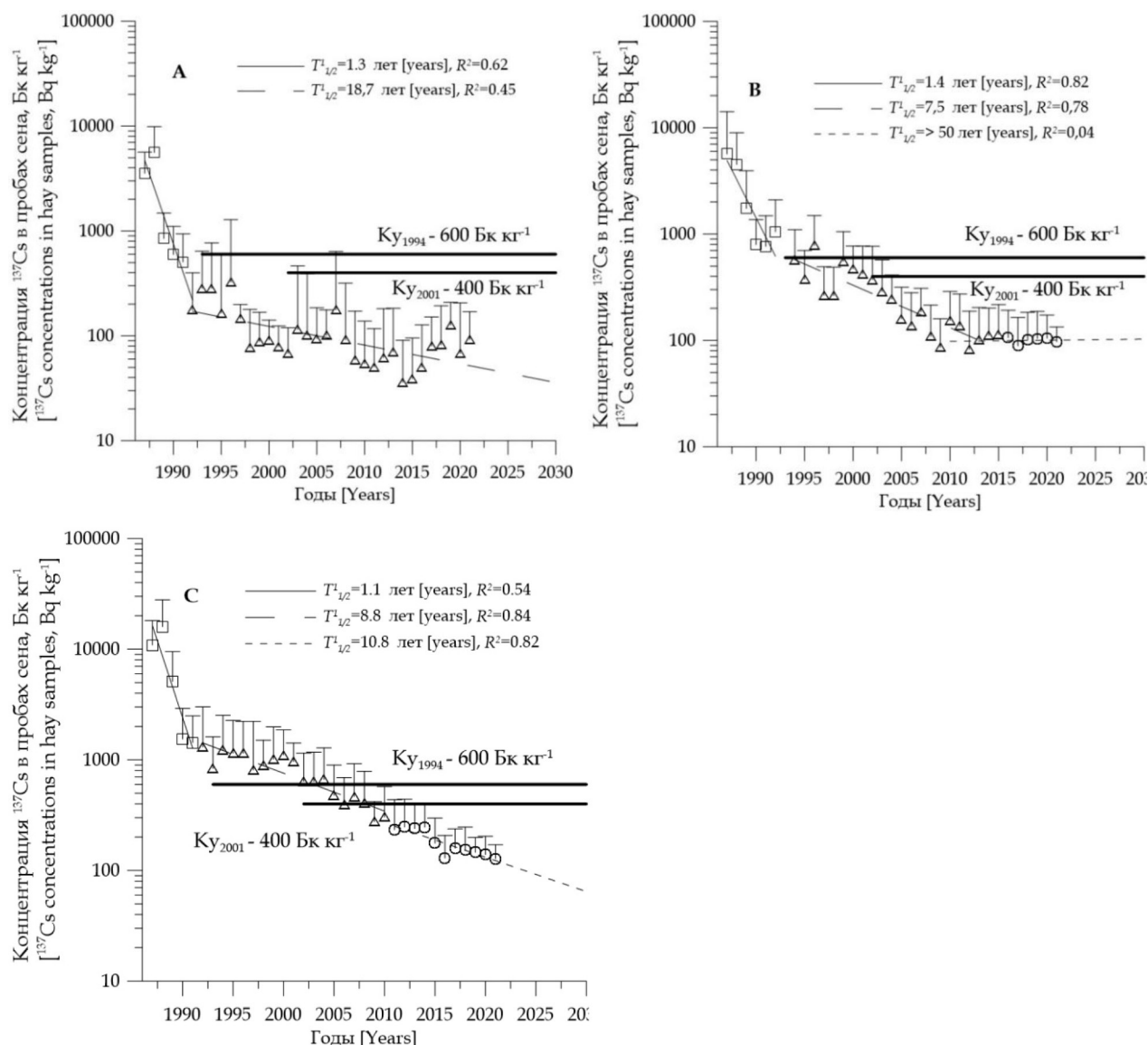


Рис. 8. Динамика снижения содержания ^{137}Cs в сене в хозяйствах с плотностью выпадений менее 185 kBq/m^2 (А), с плотностью выпадений между 185 и 555 kBq/m^2 (В) и с плотностью выпадений более 555 kBq/m^2 (С)
[Fig. 8.] Dynamics of ^{137}Cs concentration reduction in hay on farms with deposition densities below 185 kBq/m^2 (A), with deposition densities between 185 and 555 kBq/m^2 (B), and with the deposition densities above 555 kBq/m^2 (C)]

Период полуснижения содержания ^{137}Cs в сене, получаемом в зоне с загрязнением угодий менее 185 kBq/m^2 , существенно превышал периоды полуснижения, рассчитанные для территорий с плотностью загрязнения сенокосов между 185 и 555 kBq/m^2 и более. Отмеченные закономерности можно объяснить прекращением проведения культуртехнических мероприятий или более значительным снижением объемов их проведения в хозяйствах с низкими уровнями загрязнения, нежели в зоне с плотностью загрязнения более 185 kBq/m^2 .

Закключение

Анализ данных по закономерностям изменения содержания ^{137}Cs в кормах в целом подтверждает выводы, сделанные при изучении закономерностей накопления этого радионуклида в продукции растениеводства, представ-

ленные в нашей предыдущей публикации [19]. Данные показывают, что динамика содержания радиоцезия в кормах во многом определялась масштабами проведения защитных мероприятий, особенно в периоды времени, когда их применение было достаточно интенсивным. Представленные данные содержат параметры снижения содержания ^{137}Cs в кормах: сене, сенаже, силосе и зеленых кормах с учетом особенностей юго-западных районов Брянской области, наиболее пострадавших после аварии на Чернобыльской АЭС. Показано, что периоды полуснижения с 1987 по 1993 г. находились в диапазоне от 0,58 до 1,4 года, 2-е периоды – от 4,4 до 34,7 лет и 3-и – от 8,9 до более чем 50 лет. Отмечены отличия в динамике снижения содержания ^{137}Cs в кормовых растениях в зонах с различной плотностью загрязнения менее 185 kBq/m^2 , от 185 kBq/m^2 до 555 kBq/m^2 и выше 555 kBq/m^2 . Первые пе-

риоды полуснижения в хозяйствах, относящихся ко всем зонам, были довольно близки, а второй период, рассчитанный для зоны с наименьшими уровнями загрязнения кормовых угодий (менее 185 Бк/м²), существенно превышал периоды для территорий с более высокими уровнями загрязнения. Периоды полуснижения, рассчитанные для сельскохозяйственных предприятий, относящихся к различным зонам загрязнения, существенно отличались, что определяет необходимость учитывать специфические условия хозяйств юго-западных районов Брянской области, пострадавших после аварии на Чернобыльской АЭС при определении стратегии перехода этих районов к нормальным условиям жизнедеятельности [25].

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Фесенко С.В. – разработка концепции исследования; анализ и интерпретация данных; написание текста статьи или ее редактирование; утверждение окончательного варианта статьи для публикации; согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой части работы.

Прудников П.В. – сбор, анализ и интерпретация данных; согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью любой части работы.

Исамов Н.Н. – сбор, анализ и интерпретация данных; согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью любой части работы.

Емлютина Е.С. – обработка, анализ и интерпретация данных; согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью любой части работы.

Епифанова И.Э. – обработка, анализ и интерпретация данных; согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой части работы.

Шубина О.А. – анализ и интерпретация данных; редактирование текста статьи; утверждение окончательного варианта статьи для публикации; согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой части работы.

Благодарности

Авторы выражают свою признательность рецензентам.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов при выполнении работы и подготовки данной статьи.

Сведения об источнике финансирования

Данные исследования выполнены в рамках фундаментальных и прикладных исследований по Программе деятельности федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»» на 2023–2027 годы (комплексная тема 5П.7. «Прикладные генетические и биотех-

нологические исследования для сельского хозяйства»).

Литература

1. Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий: Монография. Под ред. Санжаровой Н.И. и Фесенко С.В. М.: РАН, 2018. 278 с. URL: <https://rirae.ru/index.php/deyatelnost/publikatsii-fgbnu-vniirae/444-osnovnye-nauchnye-publikatsii-sotrudnikov-fgbnu-vniirae-v-2018-g> (Дата обращения: 22.01.2023).
2. Романович И.К., Историк О.А., Брук Г.Я., и др. К вопросу о необходимости применения радиологических мер защиты населения, проживающего на радиоактивно загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС территориях, через 30 лет после аварии. Сборник докладов всероссийской научно-практической конференции «Профилактическая медицина – 2016», 15-16 ноября 2016 года. Под ред. А.В. Мельцера, И.Ш. Якубовой. Ч. 1. СПб.: СЗГМУ, 2016. С. 149–151.
3. Балонов М.И. (редактор). Справочник по радиационной обстановке и дозам облучения, полученным в 1991 году населением территорий Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС. СПб.: «Ариадна – Аркадия», 1993.
4. Jacob P., Fesenko S., Firsakova S.K., et al. Remediation strategies for rural territories contaminated by the Chernobyl accident // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2001. Vol. 56. P. 51-76.
5. Fesenko S.V., Alexakhin R.M., Balonov M.I., et al. An extended critical review of twenty years of countermeasures used in agriculture after the Chernobyl accident // *Science of the Total Environment*. 2007. Vol. 383. P. 1-24.
6. Alexakhin R.M., Fesenko S.V., Sanzharova N.I., et al. Serious radiation accidents and the radiological impact on agriculture // *Radiation Protection Dosimetry*. 1996. Vol. 64. P. 37–42.
7. Fesenko S.V., Jacob P., Alexakhin R., et al. Important factors governing exposure of the population and countermeasure application in rural settlements of the Russian Federation in the long term after the Chernobyl accident // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2001. Vol. 56. P. 77-98.
8. Панов А.В., Фесенко С.В., Санжарова Н.И., и др. Влияние сельскохозяйственных контрмер на облучение населения территорий, пострадавших от аварии на Чернобыльской АЭС // *Радиация и риск*. 2006. Т. 46, № 2. С. 273–279.
9. Fesenko S.V., Alexakhin R.M., Sanzharova N.I., Spiridonov S.I. Dynamics of ¹³⁷Cs concentration in agricultural products in areas of Russia contaminated as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant // *Radiation Protection Dosimetry*. 1995. Vol. 60, № 2. P. 155-166.
10. Маркина З.Н., Курганов А.А., Воробьев Г.Т. Радиоактивное загрязнение продукции растениеводства Брянской области. Брянск: Брянский Центр «Агрохимрадиология», 1997. 242 с.
11. Прудников П.В. Использование агрономических руд и новых комплексных минеральных удобрений на радиоактивно загрязненных почвах. Брянск: Брянский Центр «Агрохимрадиология», 2012. 123 с.
12. Alexakhin R.M., Sanzharova N.I., Fesenko S.V., et al. Chernobyl radionuclide distribution, migration, and environmental and agricultural impacts // *Health Physics*. 2007. Vol. 93, No 5. P. 418–426.
13. Fesenko S.V., Sanzharova N.I., Karpenko Ye.I., et al. Radioecological monitoring and its role in ensuring the safety of nuclear power plants // *Nuclear Energy and Technology*. 2022. Vol. 8, No 1. P. 43-48. <https://doi.org/10.3897/nucet.8.82619>.
14. Фесенко С.В., Исамов Н.Н., Прудников П.В., Емлютина Е.С. Радиоэкологическое обоснование контрольных уровней содержания ¹³⁷Cs в кормах сельскохозяйственных животных // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2021. Т. 61, № 6. С. 652–663.

15. Smith J.T., Fesenko S.V., Howard B.J., et al. Temporal Change in Fallout ^{137}Cs in Terrestrial and Aquatic Systems: A Whole Ecosystem Approach // *Environmental Science and Technology*. 1999. Vol. 33. P. 49-54.
16. Fesenko S.V., Colgan P.A., Sanzharova N.I., et al. The dynamics of the transfer of caesium-137 to animal fodder in areas of Russia affected by the Chernobyl accident and resulting doses from the consumption of milk and milk products // *Radiation Protection Dosimetry*. 1997. Vol. 69, No 4. P. 289–299.
17. Фесенко С.В., Санжарова Н.И., Лисянский К.Б., Алексахин Р.М. Динамика снижения коэффициентов перехода ^{137}Cs в сельскохозяйственные растения после аварии на Чернобыльской АЭС // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 1998. Т. 38, № 2. С. 256-273.
18. Fesenko S.V., Prudnikov P.V., Isamov N.N., et al. Dynamics of ^{137}Cs concentration in fodder in the long-term after the Chernobyl accident // *Biology Bulletin*. 2022. Vol. 49, No 12. P. 153–162.
19. Фесенко С. В. Прудников П.В., Емлютина Е.С. и др. Динамика содержания ^{137}Cs в сельскохозяйственной продукции Брянской области после аварии на ЧАЭС: зерно, картофель и овощи // *Радиационная гигиена*. 2022. Т. 15, № 4. С. 45-57.
20. Balonov M., Kashparov V., Nikolaenko A., et al. Harmonization of standards for permissible radionuclide activity concentrations in foodstuffs in the long term after the Chernobyl accident // *Journal of Radiological Protection*. 2018. Vol. 38. P. 854–867.
21. Гераськин С.А., Фесенко С.В., Черняева Л.Г., Санжарова Н.И. Статистические методы анализа эмпирических распределений коэффициентов накопления радионуклидов растениями // *Сельскохозяйственная биология*. 1991. №1. С. 130-137.
22. Fesenko S., Shinano T., Onda Yu., Dercon G. Dynamics of radionuclide activity concentrations in weed leaves, crops and of air dose rate after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020. Vol. 222. P.106347.
23. Tagami K., Hashimoto S., Kusakabe M., et al. Pre- and post-accident environmental transfer of radionuclides in Japan: lessons learned in the IAEA Modaria II programme // *Journal of Radiological Protection*. 2022. Vol. 42, № 2. 020509. doi: 10.1088/1361-6498/ac670c.
24. Tagami K., Uchida S. Effective half-lives of ^{137}Cs in giant butterbur and field horsetail, and the distribution differences of potassium and ^{137}Cs in aboveground tissue parts // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2015. Vol.141. P.138–145.
25. Санжарова Н.И., Фесенко С.В., Романович И.К., и др. Радиологические аспекты возвращения территорий Российской Федерации, пострадавших в результате аварии на Чернобыльской АЭС, к условиям нормальной жизнедеятельности // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2016. Т. 56, № 2. С. 322–335.

Поступила: 22.01.2023 г.

Фесенко Сергей Викторович – главный научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии. **Адрес для переписки:** 249032 Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, Российская Федерация. E-mail: Corwin_17F@mail.ru

Прудников Петр Витальевич – директор Брянского центра «Агрохимрадиология», п. Мичуринский, Брянская область, Россия

Исамов Низам Низамович – заведующий лабораторией Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

Емлютина Евгения Сергеевна – научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

Епифанова Ирина Эдуардовна – главный специалист Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

Шубина Ольга Андреевна – заместитель директора Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

Для цитирования: Фесенко С.В., Прудников П.В., Исамов Н.Н., Емлютина Е.С., Епифанова И.Э., Шубина О.А. Динамика содержания ^{137}Cs в кормах сельскохозяйственных животных в районах Брянской области, пострадавших после аварии на ЧАЭС // *Радиационная гигиена*. 2023. Т. 16, № 1. С. 104-119. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-104-119

Dynamics of ^{137}Cs concentrations in agricultural products after the Chernobyl accident: cereals, potato, and vegetables

Sergey V. Fesenko¹, Pyotr V. Prudnikov², Nizam N. Isamov¹, Evgeniya S. Emlyutina¹, Irina E. Epifanova¹, Olga A. Shubina¹

¹ Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

² Bryansk Center of Agrokhimradiologia, Michurinskiy settlement, Bryansk Region, Russia

The paper continues the cycle of publications addressed to the study of regularities of ^{137}Cs content changes in agricultural products after the Chernobyl accident. The aim of the studies was to analyze the information describing changes in the ^{137}Cs concentrations in agricultural animal forage: hay, haylage, silage and green fodder in the southwestern districts of the Bryansk region affected by the contamination after the ChNPP accident. The data on countermeasures in the fodder production are given and the system of radiological monitoring of fodder contamination is described. It is shown that the dynamics of changes in the ^{137}Cs concentrations in fodder was mainly determined by the dynamics of implementation of remedial measures. The effective half-lives of ^{137}Cs concentration in forages during the first period after the accident (1987–1990) varied from 0.57 to 2.7 years. Subsequently (1991–2021) the decrease in feed contamination slowed down and the half-lives ranged from 8.0 to 50.0 years and longer depending on the scope of remediation and the characteristics of the plants used for the animal feed production.

Key words: Chernobyl nuclear power plant, agricultural products, southwestern districts of Bryansk region, monitoring in agriculture, ^{137}Cs .

Authors' contribution

Sergey V. Fesenko – development of research concept; analysis and interpretation of data; writing or editing of the paper; approval of the final version of the paper for publication; agreement to be responsible for all aspects of the paper, ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy or integrity of any part of the paper.

Pyotr V. Prudnikov – data collection, analysis, and interpretation; agreement to be responsible for all aspects of the paper, ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy of any part of the paper.

Nizam N. Isamov – data collection, analysis, and interpretation; agreement to be responsible for all aspects of the paper, ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy of any part of the paper.

Evgeniya S. Emlyutina – data processing, analysis, and interpretation; agreement to be responsible for all aspects of the paper, ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy of any part of the paper.

Irina E. Epifanova – data processing, analysis, and interpretation; agreement to be responsible for all aspects of the paper, ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy or integrity of any part of the paper.

Olga A. Shubina – analysis and interpretation of data; editing of the text of the paper; approval of the final version of the paper for publication; agreement to be responsible for all aspects of the paper, ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy or integrity of any part of the paper.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the reviewers.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest in the performance of the work and preparation of this article.

Information about the source of funding

These studies were carried out within the framework of fundamental and applied research on the Program of activities of The National Research Center «Kurchatov Institute» for 2023–2027 (complex project 5P.7. “Applied genetic and biotechnological research for agriculture”).

References

1. Radioecological consequences of the Chernobyl accident: biological effects, migration, rehabilitation of contaminated areas: Monograph Edited by Sanzharova N.I. and Fesenko S.V. Moscow; RAS. 2018. 278 p. URL: <https://rirae.ru/index.php/deyatelnost/publikatsii-fgbnu-vniirae/444-osnovnye-nauchnye-publikatsii-sotrudnikov-fgbnu-vniirae-v-2018-g>. (Available from January 22, 2023) (In Russian).
2. Romanovich IK, Istorik OA, Bruk GYa, Bratilova AA, Gromov AV. On the Need for Radiological Protection Measures for Population Living in Areas Radioactively Contaminated as a Result of the Chernobyl NPP Accident, 30 Years After the Accident. In: AV Meltser, ISh Yakubova. (eds.) “Preventive Medicine – 2016: Proceedings of the All-Russian Scientific-Practical Conference. November 15–16, 2016. Saint-Petersburg: Publishing house of Northwestern State Medical University named after I.I. Mechnikov; 2016. P. 149–151. (In Russian).
3. Balonov MI. (Editor). Handbook on Radiation Situation and Doses of Exposure Received in 1991 by Population of

Sergey V. Fesenko

All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology

Address for correspondence: Kievskoe highway, 109 km, Obninsk, Kaluga region, 249032, Russia; E-mail: Corwin_17F@mail.ru

- Russian Federation Territories Subjected to Radioactive Contamination as a Result of the Chernobyl Accident. St. Petersburg: Ariadna-Arkadia Publishing House; 1993. (In Russian)
4. Jacob P, Fesenko S, Firsakova SK, Likhtarev IA, Schotola C, Alexakhin RM, et al. Remediation strategies for rural territories contaminated by the Chernobyl accident. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2001;56: 51-76.
 5. Fesenko SV, Alexakhin RM, Balonov MI, Bogdevitch IM, Howard BJ, Kashparov VA, et al. An extended critical review of twenty years of countermeasures used in agriculture after the Chernobyl accident. *Science of the Total Environment*. 2007;383: 1-24.
 6. Alexakhin RM, Fesenko SV, Sanzharova NI. Serious radiation accidents and the radiological impact on agriculture. *Radiation Protection Dosimetry*. 1996;64: 37-42.
 7. Fesenko SV, Jacob P, Alexakhin R, Sanzharova NI, Panov A, Fesenko GA, et al. Important factors governing exposure of the population and countermeasure application in rural settlements of the Russian Federation in the long term after the Chernobyl accident. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2001;56: 77-98.
 8. Panov AV, Fesenko S.V., Sanzharova NI, Alexakhin RM, Prudnikov PV, Pasternak AD. Influence of agricultural countermeasures on exposure of the population of the territories affected by the Chernobyl accident. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2006;46(2): 273-279. (In Russian).
 9. Fesenko SV, Alexakhin RM, Sanzharova NI, Spiridonov SI. Dynamics of ^{137}Cs concentration in agricultural products in areas of Russia contaminated as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *Radiation Protection Dosimetry*. 1995;60(2): 155-166.
 10. Markina ZN, Kurganov, AA, Vorobyov GT. Radioactive contamination of crop production in Bryansk: Bryansk Center "Agrokhimradiology"; 1997. 242 p. (In Russian).
 11. Prudnikov PV. The use of agronomic ores and new complex mineral fertilizers on radioactively contaminated soils. Bryansk: Bryansk Center "Agrokhimradiology"; 2012. 232 p. (In Russian).
 12. Alexakhin RM, Sanzharova NI, Fesenko SV, Spiridonov SI, Panov AV. Chernobyl radionuclide distribution, migration, and environmental and agricultural impacts. *Health Physics*. 2007;93(5): 418-426.
 13. Fesenko SV, Sanzharova NI, Karpenko Yel, Isamov NN, Kuznetsov VK, Panov AV, et al. Radioecological monitoring and its role in ensuring the safety of nuclear power plants. *Nuclear Energy and Technology*. 2022;8(1): 43-48. <https://doi.org/10.3897/nucet.8.82619>.
 14. Fesenko SV, Isamov NN, Prudnikov PV, Emlyutina ES. Radiological Justification of Reference Levels of ^{137}Cs Concentrations in Fodder of Agricultural Animals. *Radiation Biology. Radioecology*. 2021;61(6): 652-663. (In Russian).
 15. Smith JT, Fesenko SV, Howard BJ, Horril AD, Sanzharova NI, Alexakhin RM, et al. Temporal Change in Fallout ^{137}Cs in Terrestrial and Aquatic Systems: A Whole Ecosystem Approach. *Environmental Science and Technology*. 1999;33: 49-54.
 16. Fesenko SV, Colgan PA, Sanzharova NI, Lissianki KB, Vazquez C, Guardans R. The dynamics of the transfer of caesium-137 to animal fodder in areas of Russia affected by the Chernobyl accident and resulting doses from the consumption of milk and milk products. *Radiation Protection Dosimetry*. 1997;69(4): 289-299.
 17. Fesenko SV, Sanzharova NI, Lissianski KB, Alexakhin PM. Dynamics of ^{137}Cs transfer factors reduction in agricultural plants after the Chernobyl accident. *Radiation Biology. Radioecology*. 1998;38(2): 256-273. (In Russian).
 18. Fesenko SV, Prudnikov PV, Isamov NN, Emlyutina ES, Titov I.E. Dynamics of ^{137}Cs concentration in fodder in the long-term after the Chernobyl accident. *Biology Bulletin*. 2022;49(12): 153-162.
 19. Fesenko SV, Prudnikov PV, Emlyutina ES, Epifanova IE, Shubina OA. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in agricultural products after the Chernobyl accident: cereals, potato, and vegetables. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(4): 45-57. (In Russian).
 20. Balonov M, Kashparov V, Nikolaenko A, Berkovskyy V, Fesenko S. Harmonization of standards for permissible radionuclide activity concentrations in foodstuffs in the long term after the Chernobyl accident. *Journal of Radiological Protection*. 2018;38: 854-867.
 21. Geraskin SA, Fesenko SV, Chernyaeva LG, Sanzharova NI. Statistical methods of analysis of empirical distributions of radionuclide accumulation factors by plants. *Agricultural Biology*. 1991;1: 130-137. (In Russian).
 22. Fesenko S, Shinano T, Onda Yu, Dercon G. Dynamics of radionuclide activity concentrations in weed leaves, crops and of air dose rate after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020;222: 106347.
 23. Tagami K, Hashimoto S, Kusakabe M, Onda Y, Howard B, Fesenko S, et al. Pre- and post-accident environmental transfer of radionuclides in Japan: lessons learned in the IAEA Modaria II programme. *Journal of Radiological Protection*. 2022; 42(2). doi: 10.1088/1361-6498/ac670c.
 24. Tagami K, Uchida S. Effective half-lives of ^{137}Cs in giant butterbur and field horsetail, and the distribution differences of potassium and ^{137}Cs in aboveground tissue parts. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2015;141: 138-145.
 25. Sanzharova NI, Fesenko SV, Romanovich IK, Marchenko TA, Razdayvodin AN, Panov AV, et al. Radiological aspects of return of the Russian Federation territories affected by Chernobyl accident to conditions of normal life activity. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 2016;56(2): 322-335. (In Russian).

Received: January 22, 2023

For correspondence: Sergey V. Fesenko – Chief Researcher, All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology (Kievskoe highway, 109 km, Obninsk, Kaluga region, 249032, Russia; E-mail: Corwin_17F@mail.ru)

Pyotr V. Prudnikov – Director, Bryansk Center "Agrokhimradiology", Michurinskiy settlement, Bryansk region, Russia

Nizam N. Isamov – Head of Laboratory All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

Evgeniya S. Emlyutina – Researcher, All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

Irina E. Epifanova – chief specialist of All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

Olga A. Shubina – Deputy Director, All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

For citation: Fesenko S.V., Prudnikov P.V., Isamov N.N., Emlyutina E.S., Epifanova I.E., Shubina O.A. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in agricultural products after the Chernobyl accident: cereals, potato, and vegetables. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No. 1. P. 104-119. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-104-119

Актуализация методики установления референтных диагностических уровней для интервенционных рентгенологических процедур

С.С. Сарычева

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

Интервенционные исследования сопровождаются высокими уровнями облучения пациентов, вплоть до возможности возникновения лучевых поражений кожи, поэтому любые меры по снижению уровней облучения пациентов для данного вида медицинских процедур имеют очень важное значение. Использование референтных диагностических уровней считается одной из наиболее успешных мер по снижению уровней облучения пациентов, однако базовая концепция их установления малоприменима для интервенционных исследований, где предположение о «стандартной» процедуре недействительно. В статье подробно изучены основные сложности применения стандартной концепции референтных диагностических уровней для процедур интервенционной радиологии и предложена новая актуальная концепция, учитывающая особенности выполнения данных процедур; проанализированы опубликованные отечественные и международные документы в этой области. В работе предложен перечень интервенционных процедур, для которых рекомендуется первоочередное установление референтных диагностических уровней, согласно статистическим данным о наиболее проводимых в Российской Федерации процедурах данного типа. Результаты данного исследования были использованы при создании новых методических рекомендаций МР 2.6.1.0296-22 «Оптимизация радиационной защиты пациентов в лучевой диагностике посредством применения референтных диагностических уровней».

Ключевые слова: референтные диагностические уровни, интервенционная радиология, эндоваскулярная хирургия.

Введение

Интервенционная радиология и интервенционная кардиология являются активно развивающимися направлениями современной клинической медицины. В последние десятилетия происходит все большее внедрение интервенционных процедур под рентгеновским контролем в клиническую практику для лечения различного рода сердечно-сосудистых, нейрохирургических, неврологических, онкологических, гинекологических, урологических и ряда других заболеваний [1]. Общее количество выполняемых интервенционных рентгенологических исследований (ИРЛИ), их разновидности и сложность отдельно взятых процедур постоянно растут [2–4]. Несмотря на то, что интервенционная радиология относится к диагностической рентгенологии и рентгеновское излучение при данных процедурах используется только для целей визуализации, уровни облучения пациентов могут быть достаточно высокими [3, 4]. Часть пациентов ввиду анатомических сложностей и/или особенностей диагноза могут подвергаться ИРЛИ несколько раз подряд, получая

суммарную дозу выше 100 мЗв менее чем за год [5, 6]. Однако преимущества успешных диагностики и лечения при выполнении интервенционных процедур, несмотря на сопровождающее их облучение, в значительной степени перевешивают радиационные риски [6]. Учитывая темпы роста частоты проведения ИРЛИ и относительно высокие дозы облучения пациентов, необходимо использовать все доступные возможности по снижению уровней облучения пациентов в этой области.

Одним из наиболее успешных способов снижения уровней облучения пациентов в диагностической рентгенологии считается внедрение референтных диагностических уровней (РДУ). В МР 2.6.1.0097 от 2015 г. «Оптимизация радиационной защиты пациентов в интервенционной радиологии» была предложена концепция установления РДУ, включающая также список наиболее распространенных в то время процедур, для которых установление РДУ было рекомендовано в первую очередь. Ввиду бурного развития интервенционной радиологии в последнее десятилетие как в техническом, так и в методическом плане (модифицированы методики

Сарычева Светлана Сергеевна

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

Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: svetlana2003@mail.ru

проведения процедур, появились новые виды ИРЛИ, усовершенствовалось оборудование для их проведения), назрела необходимость в пересмотре подхода к установлению РДУ и обновлению списка процедур.

Цель исследования – актуализация методики установления РДУ для процедур интервенционной радиологии с учетом накопленных российских и общемировых данных за последние десятилетия.

Определение и история установления РДУ

Согласно Российским методическим документам МР 2.6.1.0066-12¹, РДУ – это установленное значение стандартной дозы или стандартного произведения дозы на площадь пучка рентгеновского излучения при типовых рентгенодиагностических процедурах в регионе или стране. Значение РДУ устанавливается равным 75-процентному квантилю распределения стандартной дозы или стандартного произведения дозы на площадь при проведении выбранной процедуры в различных медицинских организациях региона или страны. Установленные РДУ используют для оценки того, не является ли уровень облучения пациента нетипично большим или малым для рассматриваемой процедуры.

Для оптимизации с помощью РДУ первоначальным этапом является сбор данных об уровнях существующего медицинского облучения при выбранных процедурах в регионе/стране. На основании полученных данных строится распределение «стандартных показателей»² для выбранной процедуры по данным из медицинских организаций региона/страны. Значение РДУ устанавливается равным 75% квантилю (75 процентилю) полученного распределения и клиникам, чьи значения «стандартных показателей» превысили значение РДУ, необходимо провести расследование причин высоких уровней облучения пациентов. Часто подобные превышения могут быть вызваны некорректной настройкой аппарата или неправильным выбором режимов/протоколов исследований. В случае ИРЛИ высокие уровни облучения могут быть вызваны целым рядом причин – высокими дозовыми характеристиками аппарата / его некорректной настройкой, неоптимальным выполнением процедур / неопытностью оператора либо высокой клинической сложностью исследований, характерной для данной операционной. В ряде публикаций призывают также обратить внимание на клиники, в которых «стандартные показатели» оказываются ниже 10-го перцентиля [8] или 25-го перцентиля [9]. Относительно низкие показатели параметров, отражающих степень использования рентгеновского излучения оператором (а именно время рентгеноскопии и количество сделанных рентгеновских снимков), могут быть результатом недостаточного качества изображения либо большого количества прерванных (по каким-либо при-

чинам не доведенных до конца) или тестовых процедур, или наоборот, демонстрировать достижение осознанной работы с излучением [7–9]. Схематически концепция РДУ изображена на рисунке 1.

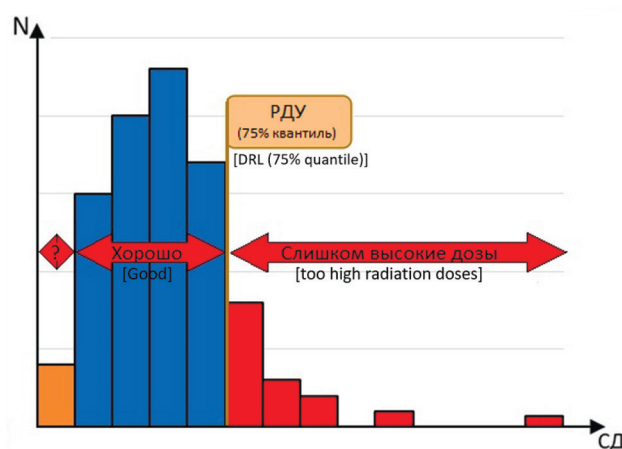


Рис. 1. Схема распределения стандартных доз и установления РДУ

[Fig. 1. Scheme of standard doses distribution and DRL (reference diagnostic levels) establishment]

Исторически РДУ были введены для диагностической рентгенологии в 1980-е гг. и стали широко использоваться в 1990-е гг. [10, 11]. Они были введены исходя из предположения, что при «стандартном» рентгеновском исследовании доза облучения каждого конкретного пациента (в рамках одного рентгеновского аппарата) будет варьироваться только в зависимости от толщины и плотности обследуемой части тела, именно поэтому для установления РДУ с каждого аппарата, как правило, требуется относительно небольшое количество стандартизованных данных [7], и путем сравнения этих данных можно легко выделить кабинеты, нуждающиеся в оптимизации.

РДУ обычно устанавливают для наиболее распространенных процедур, а также процедур, которые могут сопровождаться значительными уровнями облучения пациентов [7]. Установление РДУ является одним из наиболее успешных мер по снижению уровней облучения в диагностической рентгенологии. Например, внедрение их в Англии и проведение соответствующих методов оптимизации привело к уменьшению среднего уровня облучения пациентов на 50% за 20 лет с того момента, как они были впервые опубликованы в 1980 г. [12]. Единичные превышения РДУ при исследовании отдельных пациентов не могут считаться нарушениями, однако большие и множественные отклонения, как правило, указывают на существование каких-либо проблем в проведении данного

¹ МР 2.6.1.0066-12 «Применение референтных диагностических уровней для оптимизации радиационной защиты пациента в рентгенологических исследованиях общего назначения», утвержденные Роспотребнадзором 23.07.2012. [MR 2.6.1.0066-12 «Using diagnostic reference levels to optimize patient radiation protection in conventional radiography», approved by Rosпотребнадзор on 23.07.2021. (In Russ.)]

² Мы сознательно взяли термин «Стандартный показатель» в кавычки, т.к. большая часть этой работы посвящена вопросу, какие именно величины следует использовать для установления РДУ в интервенционной радиологии.

вида исследования на конкретном аппарате в конкретном учреждении. В подобных случаях нужно проводить исследование для выявления причин подобных отклонений с последующей коррекцией настроек оборудования, режимов исследования и/или мер по организации дополнительной защиты пациента [13], принимая во внимание безусловный приоритет достижения медицинских целей.

Использование РДУ признано крайне полезным для простых диагностических исследований, например, таких как рентгенография грудной клетки, с относительно небольшим количеством процедурных переменных [7,9], однако гораздо сложнее реализовать концепцию РДУ для интервенционных процедур, где предположение о «стандартном» обследовании недействительно [7].

Особенности установления РДУ в интервенционной радиологии

Особенностями установления РДУ для ИРЛИ является «нестандартность» процедур – сильная зависимость параметров исследования от оперирующего рентгенохирурга (методики проведения исследования) и анатомических особенностей каждого пациента (состояние сосудов, вес, вид и локализация патологии), а также относительно высокие уровни облучения пациентов, при которых, наряду с рисками возникновения стохастических последствий облучения (радиогенные раки и др.), существуют также риски возникновения детерминированных эффектов в коже (эритема и др.). ИРЛИ являются сложными (комплексными) процедурами, и уровень облучения пациента, подвергающегося данным процедурам, зависит от множества факторов, не всегда коррелирующих друг с другом.

Согласно рекомендациям Комитета 3 МКРЗ от 2009 г., установление РДУ должно иметь комплексный подход, т.е. необходимо установление не единичного значения в терминах наиболее подходящей для этого величины, а нормирование нескольких величин [14, 15]. В качестве основной величины для РДУ предлагалось использование величины произведения дозы на площадь (ПДП) как наиболее информативной дозиметрической величины, на основании которой строится оценка эффективной дозы облучения пациента; а в качестве дополнительных величин – значения общего времени рентгеноскопии и суммарного количества снимков за исследование. Отмечается, что РДУ должны служить только для выявления «отклонений» и являться только поводом, чтобы разобраться в причинах: либо это недостаточная оптимизация, либо данная клиника всегда ведет более сложные случаи [14, 15]. Дополнительные величины, необходимые для оценки методики проведения исследований (степени использования излучения) в данной конкретной клинике, данной рентгенохирургической бригадой выражаются в терминах общего времени рентгеноскопии и суммарного количества снимков за исследование. Они позволяют оценить, является ли повышенное значение ПДП (основного параметра РДУ) показателем высокой степени использования излучения, или причиной превышения являются заданные рабочие параметры ангиографического аппарата, создающие высокие уровни излучения. Использование предложенного МКРЗ комплексного РДУ удобно с точки зрения наглядности причин превышения уровней облучения, однако не рассматривает вопрос де-

терминированных эффектов, РДУ вводится исключительно со своей исконной целью – уменьшения стохастических рисков облучения.

В МР 2.6.1.0097 для установления РДУ с целью оптимизации ИРЛИ было также рекомендовано контролировать и анализировать несколько параметров исследования: суммарное значение произведения дозы на площадь (ПДП) за исследование, на основании которого выполняется дальнейшая оценка доз у пациента: эффективной дозы и максимальной поглощенной дозы в коже (МПДК); суммарное количество снимков за исследование (Nсн); общее время рентгеноскопии за исследование (Тск). Недостатком этого уже немного устаревшего подхода является предложение по использованию ПДП в качестве величины, на основании которой, помимо оценки риска возникновения стохастических эффектов, выполняется также оценка кожной дозы. К сожалению, без информации о геометрических параметрах процедуры (размер и локализация поля облучения), величина ПДП не может однозначно ответить на вопрос, вызвано ли большое значение ПДП облучением малыми полями с большой дозой или использованием больших полей излучения с малыми дозовыми характеристиками.

На данный момент основной дозиметрической величиной, используемой для оценки уровня облучения кожи пациента, считается величина кумулятивной дозы (КД) – значение накопленной воздушной кермы (поглощенной дозы в воздухе) во входной опорной точке пациента [16,17]. Согласно МЭК 60601-2-43, кумулятивная доза – это накопленное значение опорной воздушной кермы на расстоянии 15 см от изоцентра по направлению к источнику, с учетом использования наклонных проекций в ходе проведения процедуры. Значение воздушной кермы в опорной точке рассчитывается программным обеспечением аппарата, с учетом используемых параметров излучения.

КД была введена непосредственно для оценки риска возникновения тканевых реакций (детерминированных эффектов) на коже пациента, поскольку, в отличие от ПДП, она не зависит от вариаций в размере поля облучения, а оценивает именно значение поглощенной дозы в коже. Данная величина является приблизительной оценкой входной кожной дозы, т.к. не всегда пациент находится на расстоянии 15 см от изоцентра; она может занижать значение кожной дозы для крупных пациентов и пациентов среднего размера при наклонных проекциях либо завышать дозу для маленьких пациентов при небольших углах обзора. Также значение КД не учитывает фактора обратного рассеяния, который может увеличить дозу облучения кожи на 10–40% в зависимости от характеристик первичного пучка излучения [18]. Тем не менее, эта наглядная величина, которая не требует сложных пересчетов и позволяет контролировать степень облучения кожи пациента.

Возможность возникновения тканевых реакций (детерминированных эффектов в коже пациента) – одна из основных особенностей интервенционной радиологии. В связи с этим оптимизация доз облучения пациентов в интервенционной радиологии должна включать не только минимизацию стохастических рисков при достаточном качестве изображения, но и задачу по предотвращению рисков возникновения тканевых реакций. Аналогичной

позиции придерживается НКРЗ США. По их мнению, использование стандартного РДУ как такового не применимо для процедур интервенционной радиологии по 2 причинам [9, 15]:

1. Для интервенционной радиологии не характерно понятие стандартной процедуры и/или стандартного пациента.

2. Стандартные РДУ не предназначены для выявления процедур, сопровождающихся превышением порога возникновения детерминированных эффектов.

Согласно мнению НКРЗ США, использование стандартного РДУ для интервенционных процедур (с использованием стандартного фантома и типовых протоколов проведения исследований) позволит лишь собрать информацию об оборудовании, однако не будет содержать информации об особенностях проведения исследований и сложности проводимых процедур в отдельном кабинете, опыте оперирующих врачей и особенностях пациентов в каждой конкретной клинике [9]. В своем Докладе 168 НКРЗ США вводит некий аналог РДУ, который противоречит МКРЗ в части учета возможности возникновения тканевых реакций. Это достигается путем сбора данных о входной дозе пациента с целью учета вероятности возникновения детерминированных эффектов. Также предлагается не ограничивать сбор данных каким-то определенным количеством исследований, а работать с максимально возможной выборкой ИРЛИ (в идеале – с полной базой данных региона/страны по каждому виду ИРЛИ) для максимальной компенсации разницы между «нестандартными» процедурами [9].

В более поздней публикации МКРЗ, вышедшей в 2017 г. и посвященной вопросам установления РДУ при медицинских рентгенологических исследованиях, комиссия постановила, что концепция РДУ применима в интервенционной радиологии, однако трудно реализуема из-за очень широкого распределения доз облучения пациентов, даже при проведении одной и той же процедуры в одном и том же учреждении [7]. Доза облучения пациента, подвергающегося ИРЛИ, сильно зависит от сложности процедуры, анатомии самого пациента, характеристик поражения и тяжести заболевания. Особо подчеркивается, что РДУ для интервенционных процедур должны разрабатываться иначе, чем для других методов визуализации.

Для наиболее точного сравнения дозиметрических данных среди пациентов, подвергающихся ИРЛИ, МКРЗ рекомендовала использовать значения ПДП и КД, нормализованные по отношению к весу или иному показателю телосложения пациентов (эти параметры влияют на толщину просвечиваемых частей тела, что, в свою очередь, влияет на исходящую мощность излучения).

Однако ряд публикаций наглядно показывает, что уровни облучения пациентов при ИРЛИ имеют гораздо большую зависимость от сложности процедуры, чем от веса пациента [14, 19], и типичные уровни облучения пациентов в выборке с диапазоном веса от 65 до 85 кг оказываются такими же, как и в выборке взрослых пациентов, неотсортированной по антропометрическим данным [14]. Что касается дополнительных параметров, таких как время рентгеноскопии и количество рентгеновских снимков, они, очевидным образом, совсем никак не связаны с толщиной исследуемых частей тела [19].

Так же, как и ранее НКРЗ США, МКРЗ перешло к необходимости установления стандартной дозы для ИРЛИ в терминах медианы распределения. Среднее значение распределения, какое обычно используется при установлении стандартной дозы и РДУ, в рентгенографии в данном случае неприменимо, т.к. распределение ИРЛИ по дозовым характеристикам не является нормальным, и средние значения будут сильно смещены в сторону длинного «хвоста» от особо сложных и высокодозных процедур.

В связи с большим влиянием сложности исследований на параметры процедур в ряде работ изучалась возможность установления значений РДУ для интервенционных кардиологических процедур с учетом сложности исследования [8, 14]. Факторами сложности для чрескожных коронарных вмешательств, которые позволяют классифицировать коронарные ИРЛИ как простые, средние или сложные, предлагались: количество пролеченных сосудов, количество поражений со сложностью выше В2 (шкала Американского колледжа кардиологов/Американской кардиологической ассоциации), количество сосудов с выраженной извитостью, количество бифуркационных стентов и т.п. [7–8, 14]. Однако даже МКРЗ признает, что данный подход требует огромного количества клинических данных, которые часто недоступны.

Методология установления отечественных РДУ для ИРЛИ

Обобщая все опубликованные на данный момент подходы к установлению РДУ в ИР, можно резюмировать следующие постулаты, которые автор считает целесообразным учитывать при установлении отечественных РДУ:

- РДУ в ИР должны быть комплексным, т.е. учитывать и стохастические риски, и возможность возникновения детерминированных эффектов, а также «нестандартность» процедур и влияние методики проведения исследований на дозы облучения пациентов;

- основной величиной для установления РДУ должно быть итоговое значение ПДП за исследование. Данная величина используется для оценки эффективных доз облучения пациентов, т.е. отвечает за оценку стохастических рисков от облучения, минимизация которых и является главной целью использования РДУ;

- РДУ также должны включать величину КД, необходимую для оценки кожной дозы, с целью учета риска возникновения детерминированных эффектов;

- РДУ для ИРЛИ должны включать параметры проведения исследований, связанные не только с дозовыми характеристиками аппарата, но и демонстрирующие степень использования излучения при проведении процедур. Этими параметрами являются общее время рентгеноскопии и суммарное количество снимков за исследование. Анализ этих данных позволяет выявить причины возможного превышения – высокие дозовые характеристики ангиографического аппарата или неоптимальность методики проведения исследования (или проведение в данной клинике более сложных вмешательств);

- при расчете стандартных показателей клиники, а именно стандартных для клиники значений ПДП, КД, времени рентгеноскопии и количества снимков для каждого вида исследования, необходимо работать с медицинскими значениями выборок, чтобы не учитывать вклад

процедур с аномально высокими дозами, который будет обусловлен сложными клиническими случаями;

- понятие «Стандартный пациент» включает всех взрослых пациентов весом от 65 до 85 кг. Для построения распределения и нахождения стандартных показателей (медианных значений) необходимо собрать данные по 30 пациентам с аппарата для каждой процедуры при работе со стандартными пациентами или иметь выборку из как минимум 50 взрослых пациентов, если параметры веса и телосложения вовсе не учитываются;

- на данном этапе не рекомендовано введение классификации ИРЛИ по степени сложности, т.к. даже в литературных данных нет единой четкой схемы, по которой можно было бы наладить процесс классификации данных. Введение дополнительных критериев может сильно усложнить процесс сбора и анализа данных;

- по мнению автора, работа с аномально низкими значениями собираемых показателей на начальном этапе нецелесообразна, т.к. на практике, если аппарат демонстрирует недостаточное качество изображения в нормальном режиме работы, персонал, как правило, начинает работать с более высокой дозовой нагрузкой, для получения более информативного изображения. Такой аппарат, вероятнее всего, будет демонстрировать высокие дозовые показатели. Это специфика интервенционной радиологии, процедуры не могут выполняться на регулярной основе без достаточного качества изображения.

Выбор процедур для установления РДУ

Согласно МР 2.6.1.0066-12 «Применение референтных диагностических уровней для оптимизации радиационной защиты пациента в рентгенологических исследованиях общего назначения», одним из оснований для внедрения РДУ в рентгенологическую практику как

инструмента радиационной защиты является высокий и постоянно растущий уровень использования ионизирующего излучения в медицинской диагностике. На рисунке 2 представлена динамика частоты проведения интервенционных процедур в РФ по годам, согласно данным журнала «Эндоваскулярная хирургия» [1].

Выбор ИРЛИ, для которых целесообразно первоочередное установление РДУ, производился, исходя из перечня наиболее проводимых исследований в Российской Федерации, на основании статистики выполнения рентгеноэндоваскулярных операций в зависимости от нозологии, представленных в журнале «Эндоваскулярная хирургия» за 2020 г. В 2020 г. в РФ функционировал 391 центр (636 операционных) по рентгеноэндоваскулярной диагностике и лечению (РЭДил), только 5 из них не предоставили количественные показатели своей деятельности для проведенного в статье статистического анализа [1].

Согласно опубликованным данным [1, 20], подавляющее большинство лечебных ИРЛИ в 2020 г., как и в предыдущие годы, выполнялось при ишемической болезни сердца. На долю чрескожных коронарных вмешательств приходилось около 75% от общего числа всех лечебных процедур. Подробная информация о распределении выполняемых на территории Российской Федерации рентгеноэндоваскулярных операций в зависимости от нозологии представлена в таблице 1. Снижение числа процедур РЭДил, выполненных в 2020 г., по сравнению с 2019 г., связано с пандемией коронавирусной инфекции и общим снижением числа медицинских процедур.

По диагностическим процедурам такой подробной раскладки собрать не удалось, однако в сборнике приводятся статистические сведения об основных видах исследований (как диагностических, так и лечебных): общее число процедур и частота их проведения в клиниках, пре-

Динамика частоты проведения интервенционных процедур в РФ
[Frequency dynamics of interventional procedures in the Russian Federation]

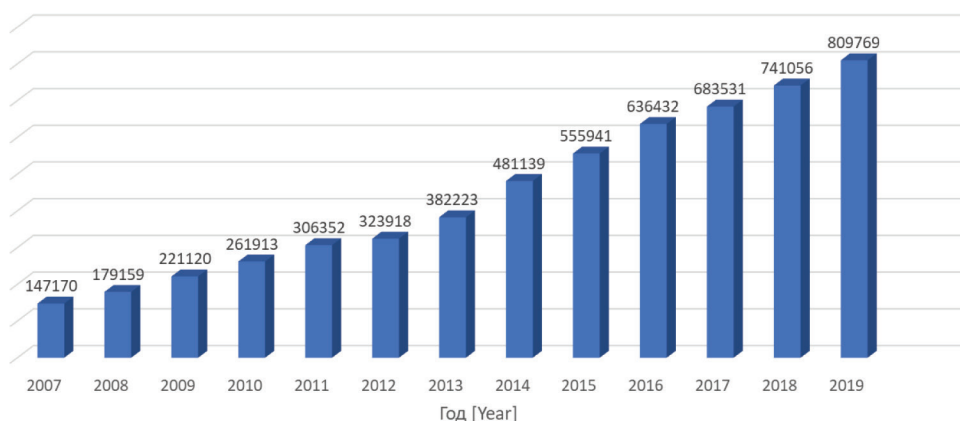


Рис. 2. Динамика частоты проведения интервенционных процедур в РФ по годам, согласно данным журнала «Эндоваскулярная хирургия» [1]

[Fig. 2. Frequency dynamics of interventional procedures performed in the Russian Federation, according to the data from the journal 'Endovascular Surgery' [1]]

³ В журнале не представлены численные показатели по диагностическим исследованиям (только количество выполненных исследований коронарных сосудов), однако диагностические исследования являются неотъемлемой частью постановки диагноза и в обязательном порядке проводятся в тех же клиниках, где выполняются терапевтические ИРЛИ соответствующих частей анатомии.

Таблица 1

**Распределение рентгеноэндоваскулярных операций, выполненных в Российской Федерации
в 2019 и 2020 гг. в зависимости от нозологии [1]**

[Table 1]

Distribution of endovascular examinations performed in the Russian Federation in 2019 and 2020 depending on the nosology [1]

Нозология [Nosology]	Количество операций (процент от общего числа) [Number of operations (percentage of total amount)]	
	2019 г.	2020 г.
Ишемическая болезнь сердца [Cardiac ischemia]	254 368 (75,9%)	227 489 (74,1%)
Патология аорты и периферических артерий [Pathology of the aorta and peripheral arteries]	40 738 (12,2%)	39 956 (13,0%)
Онкологические заболевания [Oncological diseases]	8 120 (2,4%)	9 374 (3,1%)
Патология интракраниальных отделов сосудов головного мозга [Pathology of the intracranial parts of cerebral vessels]	7 346 (2,2%)	8 165 (2,7%)
Врожденные и приобретенные пороки сердца и сосудов [Congenital and acquired heart malformations and blood vessels]	8 079 (2,4%)	7 838 (2,6%)
Венозная патология [Venous pathology]	6 288 (1,9%)	6 131 (2,0%)
Гинекологические заболевания [Gynecological diseases]	5 925 (1,8%)	4 542 (1,5%)
Урологические заболевания [Urological diseases]	1 376 (0,4%)	1 075 (0,4%)
Прочие вмешательства [Other interventions]	1 732 (0,8%)	2 452 (0,8%)
Всего [Total]	334 972 (100%)	307 022 (100%)

доставивших информацию. Подобная информация позволила выделить перечень основных видов ИРЛИ, имеющих высокие численные показатели количества ежегодно выполняемых процедур, а также имеющих широкий охват лечебных учреждений, в которых они выполняются.

Для диагностических ИРЛИ, так же, как и для лечебных, наибольший вклад имеют коронарные исследования: доля диагностических коронарографий от общего количества всех исследований составила 65% в 2019 г. и 62% в 2020 г. Однако, несмотря на то, что исследования сосудов сердца являются преимущественным направлением ИРЛИ, вводить РДУ только для процедур интервенционной кардиологии было бы некорректно, т.к. большая часть клиник не являются чисто кардиологическими центрами, а занимаются также лечением нейрохирургических, неврологических, онкологических, гинекологических, урологических и ряда других заболеваний. Ниже приведен общий список исследований, для которых рекомендовано установление РДУ, сгруппированный по анатомическим областям. В скобках указано число клиник, выполняющих данный вид ИРЛИ в 2021 г., согласно [20], и их процент от общества числа клиник, предоставивших данные:

- исследования сосудов сердца:
 - диагностическая коронарография (352 (91%));
 - ангиопластика и стентирование коронарных артерий (324 (84%));
- исследования сосудов головного мозга и каротидных зон:

- церебральная ангиография³;
- церебральная эмболизация (аневризм и артерио-венозных мальформаций) (122 (32%));
- тромбэкстракция сосудов головного мозга (125 (32%));
- ангиопластика и стентирование внутренних сонных артерий (223 (60%));
- исследования в абдоминальной области;
- ангиография почечной артерии³;
- эмболизация/химиоэмболизация сосудов печени (140 (36%));
- протезирование аневризм брюшного отдела аорты (100 (26%));
- исследования в области таза (мочеполовая система):
- эмболизация/химиоэмболизация маточных артерий (185 (48%));
- эмболизация при варикоцеле (69 (18%));
- исследования сосудов нижних конечностей;
- ангиография нижних конечностей³;
- стентирование и ангиопластика подвздошных артерий (245 (63%));
- стентирование и ангиопластика бедренных артерий (241 (62%));
- установка кава-фильтров (191 (49%)).

Представленный перечень процедур был составлен по результатам анализа статистических данных из специальных выпусков журнала «Эндоваскулярная хирургия» за последние годы [1, 20]. Перечисленные про-

цедуры, во-первых, имеют существенный количественный вклад в общую долю проводимых исследований на протяжении последних лет, а во-вторых, выполняются в большинстве центров РЭДил на территории Российской Федерации.

РДУ в международных документах/публикациях

В последнее десятилетие было опубликовано много работ по установлению национальных РДУ в разных странах. Большинство публикаций посвящено вопросам установления РДУ для интервенционной кардиологии [21–26], поскольку коронарные исследования являются основным массивом ИРЛИ. В таблице 2 приведены численные значения РДУ (в терминах ПДП, КД, N-снимков и Т-скопии) для коронарографии, принятые в разных странах.

Изначально в рамках данной работы планировалось обобщить имеющийся международный опыт и предложить в качестве предварительных «справочных» значений РДУ, рассчитанные на основании множества имеющихся опубликованных данных. Однако при работе с материалами стала очевидна необоснованность введения усредненных «справочных» значений и необходимость учета специфики проведения исследований в каждом отдельном регионе/стране/учреждении. Данные, представленные в таблице 2, наглядно демонстрируют, насколько сильно отличаются друг от друга РДУ даже для таких относительно стандартизованных исследований, как коронарография.

Заключение

РДУ для процедур интервенционной радиологии должны быть комплексным, т.е. учитывать и стохастические риски, и возможность возникновения детерминированных эффектов, а также «нестандартность» процедур и влияние методики проведения исследований на дозы облучения пациентов. В качестве основной величины предлагается использовать итоговое значение ПДП за исследование (напрямую измеряемая величина, используемая для расчета эффективной дозы), поскольку главной целью

внедрения РДУ является минимизация стохастических рисков от облучения. Комплексные РДУ также должны включать величину КД, необходимую для оценки кожной дозы, с целью учета риска возникновения детерминированных эффектов и параметры проведения исследований, демонстрирующие степень использования излучения рентгенохирургом при проведении процедур – время рентгеноскопии и количество снимков за исследование (данные показатели особенно информативны и полезны для последующей за установлением РДУ процедуры оптимизации). В понятие «Стандартный пациент ИРЛИ» рекомендуется включать всех взрослых пациентов весом от 65 до 85 кг, а при расчете стандартных показателей кабинета/клиники (ПДП, КД, Т-скопии, N-снимков) – работать с медианными значениями выборок. Предложенный перечень ИРЛИ для установления РДУ включает основные проводимые на данный момент процедуры, имеющие существенный вклад в общую долю исследований и выполняющиеся в большинстве центров РЭДил на территории РФ. Результаты данной работы отражены в новом нормативном документе Роспотребнадзора – МР 2.6.1.0296-22 «Оптимизация радиационной защиты пациентов в лучевой диагностике посредством применения референтных диагностических уровней».

Информация о конфликте интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Исследование не имело финансовой поддержки.

Литература

1. Алекан Б.Г., Григорьян А.М., Стаферов А.В., Карапетян Н.Г. Рентгенэндоваскулярная диагностика и лечение заболеваний сердца и сосудов в Российской Федерации – 2020 год. Эндоваскулярная хирургия. 2021. Т. 8, (Специальное издание). С. 5-248.
2. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103 // Ann ICRP. 2007. Vol. 37, No 2-4. P. 1-332.
3. López P.O., Dauer L.T., Loose R., et al. ICRP Publication 139: Occupational Radiological Protection in Interventional Procedures // Ann ICRP. 2018 Mar. Vol. 47, No 2. P. 1-118.

Референтные диагностические уровни для коронарографии для разных стран

Таблица 2

[Table 2]

Diagnostic reference levels for coronary angiography from different countries

Страна [Country]	ПДП [Гр · см ²] [DAP[Gy·cm ²]]	КД [мГр] [CD [mGy]]	Nch [шт] [Ngr [pcs]]	Tsc [сек] [Tsc [sec]]
Европа (12 стран) [21] [Europe (12 countries)]	35	460	–	–
МАГАТЭ [14] [IAEA study]	50	–	9	1000
Финляндия [25] [Finland]	30	–	4	–
Швейцария [26] [Switzerland]	80	–	7	1400
Италия [27] [Italy]	67,8	988	7,1	–
Европа (SENTINEL исследование) [28] [Europe (SENTINEL study)]	45	650	6,5	700

4. Miller D.L., Vañó E., Bartal G., et al. Cardiovascular and Interventional Radiology Society of Europe; Society of Interventional Radiology. Occupational radiation protection in interventional radiology: a joint guideline of the Cardiovascular and Interventional Radiology Society of Europe and the Society of Interventional Radiology // *Journal of Vascular and Interventional Radiology*. 2010 May. Vol. 21, No 5. P. 607-15.
5. Li X., Hirsch J.A., Rehani M.M., et al. Radiation effective dose above 100 mSv from fluoroscopically guided intervention: frequency and patient medical condition // *American Journal of Roentgenology*. 2020. P. 1–7.
6. Rehani M.M., Nacouzi D. Higher patient doses through X-ray imaging procedures // *Physica Medica*. 2020 Nov. Vol. 79. P. 80-86.
7. Vañó E., Miller D.L., Martin C.J., et al. ICRP Publication 135: Diagnostic Reference Levels in Medical Imaging // *Ann ICRP*. 2017 Oct. Vol. 46, No 1. P. 1-144.
8. Balter S., Miller D.L., Vano E., et al. A pilot study exploring the possibility of establishing guidance levels in x-ray directed interventional procedures. *Physica Medica*. 2008 Feb. Vol. 35, No 2. P. 673-80.
9. NCRP, 2010. Radiation Dose Management for Fluoroscopically Guided Interventional Medical Procedures. NCRP Report No. 168. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
10. ICRP Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Publication 60 // *Ann. ICRP*. 1991. Vol. 21, No 1–3.
11. ICRP, Diagnostic reference levels in medical imaging: review and additional advice. ICRP Supporting Guidance 2 // *Ann. ICRP*. 2001. Vol. 31, No 4.
12. Hart D., Hillier M.C., Wall B.F. Doses to patients from medical x-ray examinations in the UK – 2000 review. NRPB-W14; 2002. P. 1-62.
13. European Commission, Directorate-General for Environment, Guidance on diagnostic reference levels (DRLs) for medical exposures, Publications Office, 1999.
14. IAEA, Establishing Guidance Levels in X Ray Guided Medical Interventional Procedures: A Pilot Study, Safety Reports Series No. 59, IAEA, Vienna (2009).
15. Сарычева С.С. Радиационная защита пациентов при проведении интервенционных рентгенологических исследований: дис... канд. биол. наук: защищена 19.12.13: утв. 16.06.14. СПб, 2013. 207 с.
16. Karambatsakidou A., Tornvall P., Saleh N., et al. Skin dose alarm levels in cardiac angiography procedures: is a single DAP value sufficient? // *British Journal of Radiology*. 2005. Vol. 78, No 933. P. 803-809.
17. Сарычева С.С. Оценка дозовых параметров, определяющих вероятность возникновения детерминированных эффектов в коже пациентов, подвергающихся интервенционным рентгенологическим исследованиям // *Радиационная гигиена*. 2020. Т. 13, № 3. С. 77-86.
18. Behrman R.H., Rees C.R. Radiation safety and protection systems. *Vascular Imaging and Intervention* pp 81-123, Jaypee Bros, New Delhi, Vol 1, Second Edition 2020.
19. Miller D.L., Kwon D., Bonavia G.H. Reference levels for patient radiation doses in interventional radiology: proposed initial values for U.S. practice // *Radiology*. 2009. Vol. 253. P. 753–764.
20. Алекан Б.Г., Григорьян А.М., Стаферов А.В., Карапетян Н.Г. Рентгенэндоваскулярная диагностика и лечение заболеваний сердца и сосудов в Российской Федерации – 2019 год // *Эндоваскулярная хирургия*. 2020. Т. 7, № 2 (Специальный выпуск). С. 5-230.
21. Siiskonen T., Ciraj-Bjelac O., Dabin J., et al. Establishing the European diagnostic reference levels for interventional cardiology // *Physica Medica*. 2018 Oct. Vol. 54. P. 42-48.
22. Sánchez R., Vañó E., Fernández Soto J.M., et al. Updating national diagnostic reference levels for interventional cardiology and methodological aspects // *Physica Medica*. 2020 Feb. Vol. 70. P. 169-175.
23. Schegerer A., Loose R., Heuser L.J., Brix G. Diagnostic Reference Levels for Diagnostic and Interventional X-Ray Procedures in Germany: Update and Handling // *Rofo*. 2019 Aug. Vol. 191, No 8. P. 739-751.
24. HPA-CRCE-034: Doses to patients from radiographic and fluoroscopic x-ray imaging procedures in the UK – 2010 review. London: Health Protection Agency; 2012.
25. Reference levels for the patient's radiation exposure in cardiology. Helsinki: Radiation and Nuclear Safety Authority; 2016.
26. Aroua A., Rickli H., Stauffer J.C., et al. How to set up and apply reference levels in fluoroscopy at a national level // *European Journal of Radiology*. 2007 Jun. Vol. 17, No 6. P. 1621-33.
27. Padovani R., Compagnone G., D'Ercole L., et al. Italian diagnostic reference levels for diagnostic and interventional radiology. *Physica Medica*. 2018. Vol. 56, No. 2. P. 1-270.
28. Padovani R., Vano E., Trianni A., et al. Reference levels at European level for cardiac interventional procedures // *Radiation Protection Dosimetry*. March-April 2008. Vol. 129, No 1-3. P. 104-107.

Поступила: 10.08.2022 г.

Сарычева Светлана Сергеевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: Svetlana2003@mail.ru

Для цитирования: Сарычева С.С. Актуализация методики установления референтных диагностических уровней для интервенционных рентгенологических процедур // *Радиационная гигиена*. 2023. Т. 16, № 1. – С. 120-129. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-120-129

Actualization of methodology of diagnostic reference levels establishment for interventional radiological procedures

Svetlana S. Sarycheva

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

Interventional procedures are accompanied with high levels of patient exposure and even with the possibility of radiation skin damage. That's why any actions leading to reduction of patients' exposure levels are of utmost importance. Implementation of diagnostic reference levels is considered to be one of the most successful actions to reduce patient exposure levels. However the basic concept of diagnostic reference levels cannot be used for interventional radiology due to fact that procedures are not standardized. The article studies the main difficulties in applying the standard concept of diagnostic reference levels for interventional radiology procedures and proposes a new concept, taking into account the specifics of these procedures; the domestic and international documents are analyzed. The list of interventional procedures for diagnostic reference levels establishment is suggested based on the statistical data on performed procedures in the Russian Federation. The results of this study were used for the new Russian guidelines "Optimization of radiation protection of patients undergoing medical radiation diagnostic examinations through the use of diagnostic reference levels".

Key words: diagnostic reference levels, interventional radiology, endovascular surgery.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Funding

The study did not have financial support.

References

- Alekyan BG, Grigoryan AM, Staferov AV, Karapetyan NG. Endovascular diagnostic and treatment of heart diseases and blood vessels in the Russian Federation – 2020. *Endovaskulyarnaya khirurgiya = Russia Journal of Endovascular Surgery*. 2021;8(special issue):5-248 (In Russian).
- The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007;37(2-4): 1-332.
- López PO, Dauer LT, Loose R, Martin CJ, Miller DL, Vañó E, et al. ICRP Publication 139: Occupational Radiological Protection in Interventional Procedures. *Annals of the ICRP*. 2018 Mar;47(2): 1-118.
- Miller DL, Vañó E, Bartal G, Balter S, Dixon R, Padovani R, et al. Cardiovascular and Interventional Radiology Society of Europe; Society of Interventional Radiology. Occupational radiation protection in interventional radiology: a joint guideline of the Cardiovascular and Interventional Radiology Society of Europe and the Society of Interventional Radiology. *Journal of Vascular and Interventional Radiology*. 2010 May;21(5): 607-15.
- Li X, Hirsch JA, Rehani MM, Ganguli S, Yang K, Liu B. Radiation effective dose above 100 mSv from fluoroscopically guided intervention: frequency and patient medical condition. *American Journal of Roentgenology*. 2020;1–7.
- Rehani MM, Nacouzi D. Higher patient doses through X-ray imaging procedures. *Phys Med*. 2020 Nov;79:80-86.
- Vañó E, Miller DL, Martin CJ, Rehani MM, Kang K, Rosenstein M, et al. ICRP Publication 135: Diagnostic Reference Levels in Medical Imaging. *Ann ICRP*. 2017 Oct;46(1): 1-144.
- Balter S, Miller DL, Vano E, Ortiz Lopez P, Bernardi G, Cotel E, et al. A pilot study exploring the possibility of establishing guidance levels in x-ray directed interventional procedures. *Physica Medica*. 2008 Feb;35(2): 673-80.
- NCRP. 2010. Radiation Dose Management for Fluoroscopically Guided Interventional Medical Procedures. NCRP Report No. 168. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD.
- ICRP Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Publication 60. *Annals of the ICRP*. 1991; 21(1-3).
- ICRP, Diagnostic reference levels in medical imaging: review and additional advice. ICRP Supporting Guidance 2. *Annals of the ICRP*. 2001; 31(4).
- Hart D, Hillier MC, Wall BF. Doses to patients from medical x-ray examinations in the UK – 2000 review. *NRPB-W14*, 2002: 1-62.
- European Commission, Directorate-General for Environment, Guidance on diagnostic reference levels (DRLs) for medical exposures, Publications Office, 1999.
- IAEA, Establishing Guidance Levels in X Ray Guided Medical Interventional Procedures: A Pilot Study, Safety Reports Series No. 59, IAEA, Vienna, 2009.
- Sarycheva S.S. Radiation protection of the patient undergoing interventional radiological examinations: PhD thesis: defence 19.12.13: approval 16.06.14. / Sarycheva S.S. St. Petersburg, 2013. 207 p. (In Russian).
- Karambatsakidou A, Tornvall P, Saleh N, Chouliaras T, Lofberg PO, Fransson A. Skin dose alarm levels in cardiac angiography procedures: is a single DAP value sufficient? *British Journal of Radiology*. 2005;78(933): 803-809.
- Sarycheva SS. Evaluation of dose parameters defining the probability of deterministic effects in the skin of patients undergoing interventional radiological examinations. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(3): 77-86. (In Russian).
- Behrman RH, Rees CR. Radiation safety and protection systems. *Vascular Imaging and Intervention* pp 81-123, Jaypee Bros, New Delhi, Vol 1, Second Edition 2020.
- Miller DL, Kwon D, Bonavia GH. Reference levels for patient radiation doses in interventional radiology: proposed initial values for U.S. practice. *Radiology*. 2009;253: 753–764.

Svetlana S. Sarycheva

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

Address for correspondence: Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: Svetlana2003@mail.ru

20. Alekyan BG, Grygoryan AM, Staferov AV, Karapetyan N.G. Endovascular diagnostic and treatment of heart diseases and blood vessels in the Russian Federation – 2019. *Russia Journal of Endovascular Surgery* 2020;7(2, special issue):5-230 (In Russian).
21. Siiskonen T, Ciraj-Bjelac O, Dabin J, Diklic A, Domienik-Andrzejewska J, Farah J, et al. Establishing the European diagnostic reference levels for interventional cardiology. *Physica Medica*. 2018;54: 42-48.
22. Sánchez R, Vañó E, Fernández Soto JM, Ten JI, Escaned J, Delgado C, et al. Updating national diagnostic reference levels for interventional cardiology and methodological aspects. *Physica Medica*. 2020;70: 169-175.
23. Schegerer A, Loose R, Heuser LJ, Brix G. Diagnostic Reference Levels for Diagnostic and Interventional X-Ray Procedures in Germany: Update and Handling. *Rofo*. 2019 Aug;191(8):739-751.
24. HPA-CRCE-034: Doses to patients from radiographic and fluoroscopic x-ray imaging procedures in the UK – 2010 review. London: Health Protection Agency; 2012.
25. Reference levels for the patient's radiation exposure in cardiology. Helsinki: Radiation and Nuclear Safety Authority; 2016.
26. Aroua A, Rickli H, Stauffer JC, Schnyder P, Trueb PR, Valley JF, et al. How to set up and apply reference levels in fluoroscopy at a national level. *European Journal of Radiology*. 2007 Jun;17(6): 1621-33.
27. Padovani R, Compagnone G, D'Ercole L, Orlacchio A, Bernardi G, Rosi A, et al. Italian diagnostic reference levels for diagnostic and interventional radiology. *Physica Medica*. 2018;56(2): 1-270.
28. Padovani R, Vano E, Trianni A, Bokou C, Bosmans H, Bor D, et al. Reference levels at European level for cardiac interventional procedures. *Radiation Protection Dosimetry*. 2008;129(1-3): 104-107.

Received: August 10, 2022

For correspondence: Svetlana S. Sarycheva – candidate of biological sciences, Senior Scientific Researcher of Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Mira Str., 8, St. Petersburg, 197101, Russia; E-mail: Svetlana2003@mail.ru)

For citation: Sarycheva S.S. Methodology actualization of diagnostic reference levels establishment for interventional radiological procedures. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023. Vol. 16, No 1, P. 120-129. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-120-129

Юбилей

15 марта 2023 г. исполнилось 95 лет академику РАН Леониду Андреевичу Ильину – Герою Социалистического Труда, лауреату Ленинской и Государственных премий СССР, лауреату Государственной премии Российской Федерации, дважды лауреату премии Правительства Российской Федерации, почетному президенту Государственного научного центра Российской Федерации – Федерального медицинского биофизического центра им. А.И. Бурназяна, доктору медицинских наук, профессору.

Л.А. Ильин в 1953 г. с отличием окончил Первый Ленинградский медицинский институт им. И.П. Павлова, а также его военно-морской факультет. В 1955 г. в период службы в Черноморском флоте в должности начальника медицинской службы боевого корабля организовал первую в Черноморском флоте радиологическую лабораторию. После демобилизации с 1958 по 1961 г. работал старшим научным сотрудником в радиобиологическом отделе одного из научно-исследовательских институтов Военно-морского флота (г. Ленинград). Принимал участие в испытаниях ядерного оружия на Новой Земле и на Семипалатинском полигоне.

С 1961 по 1968 г. был руководителем лаборатории радиационной защиты и заместителем директора по научной работе Ленинградского научно-исследовательского института радиационной гигиены.

В 1968 г. профессор Л.А. Ильин в 40-летнем возрасте возглавил крупнейший в мире научный центр в области радиобиологии, радиационной медицины и радиационной безопасности – Институт биофизики Минздрава СССР, которым он руководил в течение 40 лет. За заслуги перед государством в 1977 г. Институт биофизики был награжден орденом Ленина.

В настоящее время академик Л.А. Ильин – почетный президент Государственного научного центра Российской Федерации – Федерального медицинского биофизического центра имени А.И. Бурназяна, созданного в результате объединения Государственного научного центра Российской Федерации, Института биофизики и Клинической больницы № 6.

Основные научные интересы Л.А. Ильина связаны с исследованиями в области токсикологии радиоактивных веществ, в том числе урана и плутония, в области медицинских средств защиты от их воздействия на организм; создания лекарственных препаратов для лечения радиационных поражений. Разработанные лекарственные препараты и системы защиты внедрены в атомной промышленности, атомном подводном флоте и в воинских частях. Многие из этих разработок были испытаны в реальных условиях Семипалатинского полигона, где Л.А. Ильин был научным руководителем радиобиологических опытов.

Как участник работ на двух атомных полигонах СССР он является ветераном подразделений особого риска.

Академик Л.А. Ильин вместе с сотрудниками впервые в мире в 1970 г., т. е. за 16 лет до аварии на ЧАЭС, обосновал комплекс медицинских мероприятий и аварийные нормативы облучения людей в этих ситуациях, что нашло



воплощение в «Методических указаниях для разработки мероприятий по защите населения в случае аварии ядерных реакторов».

В настоящее время Леонид Андреевич много внимания уделяет задачам обеспечения безопасности населения и профессионалов в связи с увеличением энерго мощностей АЭС в стране, созданием плавучих АЭС и возникновением проблем радиологического терроризма.

С первых дней чернобыльской аварии Л.А. Ильин находился в очаге катастрофы, где, будучи научным руководителем работ по защите ликвидаторов и населения, принимал ответственные решения. По поручению Председателя Правительства СССР Н.И. Рыжкова он осуществлял координацию медико-биологических и радиационно-гигиенических задач, включая проблемы эвакуации населения.

Академики Л.А. Ильин и Ю.А. Израэль в начале мая 1986 г. были приглашены на заседание Политбюро ЦК компартии Украины, где стоял вопрос об эвакуации трехмиллионного населения г. Киева. Л.А. Ильиным и Ю.А. Израэлем на основании дозиметрических данных были сделаны научные прогнозы и доказана несостоятельность и опасность принятия подобного решения. Как известно, прогноз Л.А. Ильина и Ю.А. Израэля и их категорические возражения против эвакуации г. Киева полностью подтвердились и оправдали себя.

Академик Л.А. Ильин в течение более чем 30 лет представлял СССР и Российскую Федерацию в Научном Комитете ООН по действию атомной радиации. Дважды избирался членом Главного комитета Международной комиссии по радиационной защите, которая определяет всю научно-техническую политику в мире в области радиационных проблем и нормирования ионизирующих излучений.

В 1980 г. в Женеве 3 отечественных ученых (Е.И. Чазов, Л.А. Ильин, М.И. Кузин) и 3 американских ученых (Б. Лаун, Э. Чевинан, Г. Миллер) создали международное движение «Врачи против ядерной войны», которое сыграло огромную роль в научном обосновании крайней опасности ядерной войны для всего человечества. В 1982 и 1984 гг. 2 изданиями на 5 языках вышла книга Е.И. Чазова, Л.А. Ильина, А.К. Гуськовой «Опасность ядерной во-

йны: точка зрения советских учёных-медиков», в которой, в частности, были опубликованы расчётные оценки Л.А. Ильина, впервые доложенные на I конгрессе этого Движения в 1981 г. о возможных медицинских последствиях термоядерной войны на европейском континенте от Атлантического океана до Уральских гор. Эти первые в мире представленные научные данные доказали невозможность достижения победы в такой войне. Общеизвестно, что они сыграли большую позитивную роль в руководящих кругах ядерных государств и, в частности, в США.

После того как США были начаты работы по созданию нейтронного оружия, направленного против СССР, Л.А. Ильин в соавторстве с политологом Т.Ф. Дмитричевым опубликовал в 1985 г. книгу под названием «Против нейтронной смерти», в которой подробно рассмотрел поражающее действие нейтронного оружия и доказал его изуверские последствия не только для людей, но и для биосферы.

Именно под воздействием авторитетного мнения ученых мысль о невозможности победы в ядерной войне нашла широкое признание, что привело к ряду очень важных шагов в направлении разрядки международной напряженности. В 1985 г. движение «Врачи против ядерной войны» было удостоено Нобелевской премии мира.

Л.А. Ильин – автор и соавтор 20 книг, в том числе фундаментальных монографий: «Основы защиты организма от воздействия радиоактивных веществ», «Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры» (после её публикации в 2001 г. уже в 2002 г. она была издана в Японии на японском языке, переведена и издана на английском языке). Монография «Реалии и мифы Чернобыля» вышла двумя изданиями и опубликована на японском и английском языках, а монография «Радиоактивный йод в проблеме радиационной безопасности» (изданной также в США) оказалась настольной книгой учёных и специалистов в области изучения и ликвидации последствий Чернобыльской аварии.

Под его научной редакцией и в соавторстве издано 4-томное «Руководство по радиационной медицине», а в 2017 г. – учебник «Радиационная гигиена» в соавторстве с профессорами И.П. Коренковым и Б.Я. Наркевичем, который по заключению специалистов должен стать настольной книгой не только для медиков, но и для всех учёных и практиков в области радиационной защиты и безопасности. В 2018 г. под редакцией Л.А. Ильина вышла очень актуальная монография «Медицинские аспекты противодействия радиологическому и ядерному терроризму».

Леонид Андреевич подготовил 7 докторов и 12 кандидатов наук, защитивших диссертации. Имеет более 20 авторских свидетельств на изобретения и открытия.

В 1978 г. Л.А. Ильин был избран действительным членом Академии медицинских наук СССР, с 1980 по 1984 г. состоял членом Президиума, а с 1984 по 1990 г. был вице-президентом АМН СССР.

За научные исследования и практические разработки в области защиты персонала, населения, а также личного состава Вооружённых сил от воздействия радиации академик Л.А. Ильин удостоен Ленинской премии, Государственных премий СССР и Российской Федерации и дважды премии Правительства Российской Федерации.

В 1988 г. за заслуги в области науки о действии радиации на организм человека и радиационной защиты Л.А. Ильин был удостоен звания Героя Социалистического Труда с вручением ему ордена Ленина и Золотой Звезды.

Л.А. Ильину объявлены в 1998 г., 2003 г. и 2014 г. благодарности Президента РФ за большой вклад в развитие отечественной науки в области радиационной защиты и за заслуги в развитии здравоохранения, медицинской науки и многолетнюю плодотворную трудовую деятельность.

В 2021 г. Л.А. Ильин награжден Почётной грамотой Президента РФ за заслуги в области здравоохранения и многолетнюю добросовестную работу.

В 2022 г. Президент РФ В.В. Путин вручил Леониду Андреевичу орден Александра Невского.

Л.А. Ильин имеет ведомственные награды министра здравоохранения, нагрудные знаки Росатома «И.В. Курчатов» 1 степени, «Е.П. Славский». Будучи членом интеллектуально-делового клуба Н.И. Рыжкова, награждён орденами Петра Великого I степени и Дмитрия Донского. В 2013 г. стал лауреатом международной премии Андрея Первозванного «Вера и Верность» за выдающийся вклад в развитие отечественной науки, спасение человеческих жизней, многолетний труд в деле укрепления мира.

Академик Л.А. Ильин – признанный мировой авторитет в области радиобиологии, радиационной медицины и радиационной безопасности. Характерной чертой Л.А. Ильина как учёного является его бескомпромиссность в вопросах отстаивания ценностей истинной науки от невежества и сиюминутной конъюнктуры. Проницательность, смелость и принципиальность в принятии решений в сложных экстремальных условиях, умение отстаивать свою научную и гражданскую позицию снискали Л.А. Ильину высокий авторитет в международных научных кругах и глубокое уважение его соратников и коллег.

Примите наши поздравления по случаю Вашего Юбилея и сердечные пожелания крепкого здоровья и активной творческой деятельности!

*Руководство и коллектив Государственного научного центра Российской Федерации – Федерального медицинского биофизического центра им. А.И. Бурназяна
Коллегия журнала «Радиационная гигиена»*

Правила для авторов журнала «Радиационная гигиена»

Правила для авторов составлены на основе «Белой книги Совета научных редакторов о соблюдении принципов целостности публикаций в научных журналах, 2012» (CSE's White Paper on Promotion Integrity in Scientific Journal Publications, 2012 Update) и «Рекомендаций по проведению, описанию, редактированию и публикации результатов научной работы в медицинских журналах, декабрь 2016» (ICMJE Recommendations for the Conduct, Reporting, Editing and Publication of Scholarly Work in Medical Journals, December 2016).

Принимаются оригинальные научные статьи на русском и английском языках, соответствующие профилю журнала «Радиационная гигиена» и отражающие результаты оригинальных научных исследований авторов, экспериментальные, теоретические статьи, обзоры, краткие сообщения, дискуссионные статьи, рецензии на работы по актуальным вопросам радиационной гигиены, писем в редакцию.

Работы для опубликования в журнале должны быть представлены в соответствии с данными требованиями:

- К опубликованию в журнале принимаются статьи на русском и английском языках. Если статья представлена на английском языке, обязательно нужно полностью дублировать ее и на русском языке. Обращаем Ваше внимание на качество английского текста!

- Материалы, представляемые в статье, не должны быть ранее опубликованы 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.

- Редакция имеет право вести переговоры с авторами по уточнению, изменению, сокращению рукописи.

- Редакция оставляет за собой право сокращать и редактировать представленные работы. Все статьи, поступающие в редакцию журнала, проходят двойное слепое рецензирование.

- 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 представлено 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. Все соавторы должны быть согласны с публикацией текущей версии статьи

- Рукописи, оформленные не в соответствии с правилами, к дальнейшему рассмотрению не допускаются.

- Объем обзорных аналитических, исторических статей не должен превышать 40 страниц

- машинописного текста; оригинальных исследований – 25 страниц, дискуссионных статей – 10, кратких сообщений и заметок из практики – 10 страниц.

- Текст статьи печатается на одной стороне листа формата A4 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.

СТРУКТУРА СТАТЬИ

Титульный лист должен содержать:

- **название статьи** должно кратко (не более 10 слов) и точно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного научного исследования. В него необходимо вложить как информативность, так и привлекательность, уникальность научного творчества автора. Не допускается использование сокращений и аббревиатур, а также торговых (коммерческих) названий приборов, медицинской аппаратуры и т.п.);

Приводится на русском и английском языках.

- **фамилия и инициалы автора(ов);**

- любые изменения в списке авторов после подачи статьи в редакцию должны быть одобрены всеми авторами.

Фамилии авторов нужно транслитерировать по системе BGN (Board of Geographic Names), представленной на сайте www.translit.ru.

- **наименование учреждений**, в которых работают авторы с указанием ведомственной принадлежности (Роспотребнадзор, Минздрав России, РАМН и т.п.), город, страна (при этом 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. **Указывается официально принятый английский вариант наименования организаций!**

- **Резюме.** После титульного листа размещается резюме статьи на русском и английском языках (объемом не менее 250 слов каждая). Резюме выполняет функцию расширенного названия статьи и повествует о ее содержании. В резюме следует излагать только релевантную информацию.

В нем должны быть четко обозначены следующие составные части:

- 1) Введение (Introduction): ставится научная проблема и цель статьи.

- 2) Материалы и методы (Materials and Methods): даются сведения об объекте и последовательности выполнения исследования.

- 3) Результаты исследования (Results): приводятся конкретные авторские результаты исследования.

- 4) Обсуждение и заключение (Discussion and Conclusion): указываются практическая значимость и перспективы исследования.

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.** Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основные положения, достижения, результаты, терминологию научного исследования.

Текст статьи

Текст оригинального научного исследования должен состоять из выделяемых заголовками разделов: «Введение», «Цель исследования», «Задачи исследования», «Материалы и методы», «Результаты исследования», «Обсуждение и заключение», «Литература».

Введение (Introduction) – постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности. Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье. При его написании автор прежде всего должен заявить общую тему исследования, обозначить проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме того, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы. Обзор литературы. Необходимо описать основные современные исследования и публикации, на которые опирается автор; современные взгляды на проблему; трудности при разработке данной темы; выделение нерешенных вопросов в пределах общей проблемы, которым посвящена статья. Желательно рассмотреть 20–40 источников и сравнить взгляды авторов; часть источников должна быть англоязычной. Важно провести сравнительный анализ с зарубежными публикациями по заявленной проблематике.

В разделе «**Материалы и методы**» (*Materials and Methods*) должны быть четко описаны методы и объекты исследования, источники и вид ионизирующего излучения, дозы, мощность дозы, условия облучения и т.д.

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.

Все радиационные единицы следует приводить в международной системе единиц измерения (СИ) (см.: ГОСТ – 8.417 – 81 ГСИ. Единицы физических величин»; В.И. Иванов В.П. Машкович, Э.М. Центр. Международная система единиц (СИ) в атомной науке и технике: Справочное

руководство. М.: Энергоиздат, 1981. 200 с.). Все результаты измерений, приводимых в статье, должны быть выражены только в системе СИ.

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.

Результаты (Results). В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого – доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты желательно сопоставить с предыдущими работами в этой области, как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективности. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Также должно быть обосновано, почему для анализа были выбраны именно эти данные. Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

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) страныпроизводителя. Например: использовали спектрофотометр «СФ16» (Россия), спектрофлуориметр фирмы «Hitachi» (Япония). Малоупотребительные и узкоспециальные термины также должны быть расшифрованы.

Таблицы

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. Следует уточнить, какие параметры статистической вариативности оценивались, например, стандартное отклонение или стандартная ошибка среднего. Не следует дублировать данные, содержащиеся в таблице, в тексте статьи, в графиках или диаграммах.

Рисунки

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 рисунков, диаграмм или таблиц в тексте обязательно должны быть ссылки. 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.

Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

Обсуждение и заключение (Discussion and Conclusion). Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде приводятся главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

- В конце статьи должны быть размещены следующие данные:

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей. Наш журнал придерживается следующих критериев авторства, разработанных ICMJE и COPE:

- существенный вклад в разработку концепции или дизайна исследования; или сбор, анализ или интерпретация данных;
- написание текста статьи или ее редактирование для важного интеллектуального содержания;
- утверждение окончательного варианта статьи для публикации;
- согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой части работы;
- иное.

Приводятся на русском и английском языках.

Благодарности. В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам. *Приводятся на русском и английском языках.*

Информация о конфликте интересов. В статье следует указать на реальный или потенциальный конфликт интересов. Если конфликта интересов нет, то следует написать, что автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Приводится на русском и английском языках.

Сведения об источнике финансирования.

Приводятся на русском и английском языках.

Список литературы

Рекомендуемое количество литературных источников: для оригинальных научных статей – не менее 25 источников, для лекций и обзоров – не более 60 источников, для других статей – не более 15 источников.

Ответственность за правильность изложения библиографических данных возлагается на автора.

В журнале используется Ванкуверский формат цитирования, который подразумевает ссылку на источник литературы в квадратных скобках и последующее упоминание источников в списке литературы и в порядке упоминания в тексте.

Прилагаются **два списка литературы.**

В первом списке литературы (Литература) библиографическое описание литературных источников должно соответствовать требованиям ГОСТа Р 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления».

Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Необходимо правильно оформить ссылку на источник. Следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки. Ссылки на принятые к публикации, но еще не опубликованные статьи, должны быть помечены словами «в печати»; авторы должны получить письменное разрешение для ссылки на такие документы и подтверждение того, что они приняты к печати. Информация из неопубликованных источников должна быть отмечена словами «неопубликованные данные/документы», авторы также должны получить письменное подтверждение на использование таких материалов.

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 51772.12001. 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

Если имеется 3–4 автора, то указываются все. Если от 5 и больше – первые 3 автора, затем ставится «и др.».

Если в **монографии** на обложке указаны основные авторы, их всех следует указать, далее поставив «и др.».

Книги и брошюры:

Сергеев И.В., Смирнова Т.П., Исаков М.Н. Лучевая диагностика в России. СПб.: НИИРГ, 2007. 123 с.

Jenkins P.F. Making sense of the chest xray: a handson guide. New York: Oxford University Press; 2005. 194 p.

Iverson C., Flanagan A., Fontanarosa P.B. et al. American Medical Association manual of style. 9th ed. Baltimore (MD): Williams & Wilkins; 1998. 660 p.

Многотомные издания или на часть книги:

Пивинский Ю.Е. Общие вопросы технологии // Неформальные огнеупоры. М., 2003. Т. 1, кн. 1. С. 430-447.

Глава или раздел из книги:

Зайчик А.Ш., Чурилов Л.П. Основы общей патофизиологии // Основы общей патологии: учеб. пособие для студентов медвузов. СПб.: ЭЛБИ, 1999. Ч. 1., гл. 2. С. 124-169.

Riffenburgh R.H. Statistics in medicine. 2nd ed. Amsterdam (Netherlands): Elsevier Academic Press; 2006. Chapter 24, Regression and correlation methods; p. 447-86.

Ettinger S.J., Feldman E.C. Textbook of veterinary medicine: diseases of the dog and cat. 6th ed. St. Louis (MO): Elsevier Saunders; 2005. Section 7, Dietary considerations of systemic problems; p. 553-98.

Статьи из журнала, сборника:

Стамат И.П., Стамат Д.И. К обоснованию нормативов по содержанию природных радионуклидов в облицовочных изделиях и материалах // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 1. С. 46-52.

Bailliff I.K., Slim H.A. Development of reference database for gamma dose assessment in retrospective luminescence dosimetry // Radiation Measurements. 2008. Vol. 43. P. 859-863.

Из сборника конференций (тезисы):

Кушинников С.И., Цапалов А.А. Проблемы достоверности оценки среднегодовой ЭРОА радона при радиационно-гигиеническом обследовании помещений. Сборник докладов и тезисов науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы обеспечения радиационной безопасности на территории Российской Федерации», Москва, 25-26 октября 2007. М., 2007. С. 50-51.

Ссылки на Интернет-ресурсы:

Официальный сайт Медицинского радиологического научного центра РАМН (МРНЦ РАМН). URL: <http://www.mrrc.obninsk/> (дата обращения: 19.02.2010).

Дубнер П.Н. Англо-русский статистический глоссарий: основные понятия/ URL: <http://masters.donntu.org/2002/fvti/spivak/library/book2/book2.htm> (дата обращения: 16.06.2019)

Ссылки на статьи с DOI:

Маткевич Е.И., Сеницын В.Е., Зеликман М.И. и др. Основные направления снижения дозы облучения пациентов при компьютерной томографии. REJR. 2018. Т.8, №3. С. 60-73. DOI:10.21569/2222-7415-2018-8-3-60-73.

Статьи, принятые к печати, но еще не вышедшие:

Горский Г.А., Еремин А.В., Стамат И.П. О необходимости радиационного обследования зданий после окончания строительства, капитального ремонта или реконструкции. Радиационная гигиена, 2010. Т. 3, № 1. Деп. 10.02.2010 г.

Патенты:

Карамуллин М.А., Шутко А.Н., Сосюкин А.Е. и др. Пат. № 2268031 Российская Федерация, МПК А61Н23.00. Способ коррекции отдаленных последствий радиационного воздействия в малых дозах. опубли. 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.

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.

Второй список литературы (References) полностью соответствует первому списку литературы. Оформляется также в соответствии с Ванкуверским форматом цитирования

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].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

После списков литературы 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 на русском и английском языках, рабочий телефон и адрес электронной почты всех авторов, идентификационный номер ORCID. Сокращения не допускаются.

ПОРЯДОК ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ В РЕДАКЦИЮ

Все статьи печатаются в журнале бесплатно.

Направляя статью для публикации в данном журнале, авторы соглашаются со следующим:

- Авторы сохраняют за собой авторские права на работу и предоставляют журналу право первой публикации работы на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC BY 4.0) которая позволяет другим распространять данную работу с обязательным сохранением ссылок на авторов оригинальной работы и оригинальную публикацию в этом журнале.
- Все авторы внимательно прочитали Этику научных публикаций журнала и с пониманием воспримут санкции за его нарушение.
- Авторы статьи принимают положения: «Авторское соглашение (публичная оферта) о публикации статьи в научном журнале «Радиационная гигиена».
- Согласно вступившей в действие IV части Гражданского кодекса РФ, между авторами статей и редакцией журнала заключается **Лицензионный договор (оферта) о предоставлении права использования произведения** издателю.

Основным способом подачи рукописи статьи в редакцию является отправка по электронной почте журнала в форме присоединенных файлов: journal@niirg.ru

При подаче рукописи должны быть загружены следующие файлы:

1. Текст рукописи (титльный лист, структурированное резюме, ключевые слова, текст статьи, полные данные об авторах, необходимые для обработки в Российском индексе научного цитирования, сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей, благодарности, информация о конфликте интересов, сведения об источниках финансирования, список литературы). На английском языке представляется следующая информация: название статьи, транслитерация фамилий авторов в латинском варианте по системе BGN (Board of Geographic Names), представленной на сайте www.translit.ru, название организации с указанием города, страны; структурированное резюме и ключевые слова; сведения об авторах в том же объеме, как на русском; сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей, благодарности, информация о конфликте интересов, сведения об источниках финансирования; список литературы – References). Формат документа при отправке в редакцию – .doc или .docx.

2. Иллюстрации в отдельных файлах в формате Tiff, JPEG с разрешением 300 dpi. При отправке файла обязательно укажите номер рисунка, соответствующий его номеру в статье.

3. Лицензионный договор о предоставлении права использования произведения издателю. Электронный вариант заполненного и подписанного всеми авторами договора следует отправить в качестве дополнительного файла в формате .pdf.

4. Официальное направление учреждения, в котором выполнена данная работа. В официальном направлении должны быть перечислены фамилии всех авторов и указано название работы в формате .pdf.

5. Экспертное заключение об отсутствии ограничений на публикацию материала в открытой печати и виза научного руководителя на первой странице статьи в формате .pdf.

ДЕЙСТВИЯ РЕДАКЦИИ В СЛУЧАЕ ОБНАРУЖЕНИЯ ПЛАГИАТА, ФАБРИКАЦИИ И ФАЛЬСИФИКАЦИИ ДАННЫХ

В случае обнаружения недобросовестного поведения со стороны автора, плагиата, фабрикаций или фальсификации данных редакция руководствуется правилами COPE. Под недобросовестным поведением мы понимаем любые действия ученого, включающие ненадлежащее обращение с объектами изучения или намеренное манипулирование научной информацией, при котором она перестает отражать наблюдаемые исследования; а также поведение ученого, которое не соответствует принятым этическим и научным стандартам.

К недобросовестному поведению журнал «Радиационная гигиена» не относит честные ошибки или честные расхождения в плане, проведении, интерпретации или оценке исследовательских методов или результатов или недобросовестное поведение, не связанное с научным процессом.

Справки по телефону: (812)2334283 и (812)2335016 (редакция журнала «Радиационная гигиена»). Факс: (812)2335363, 2334283.