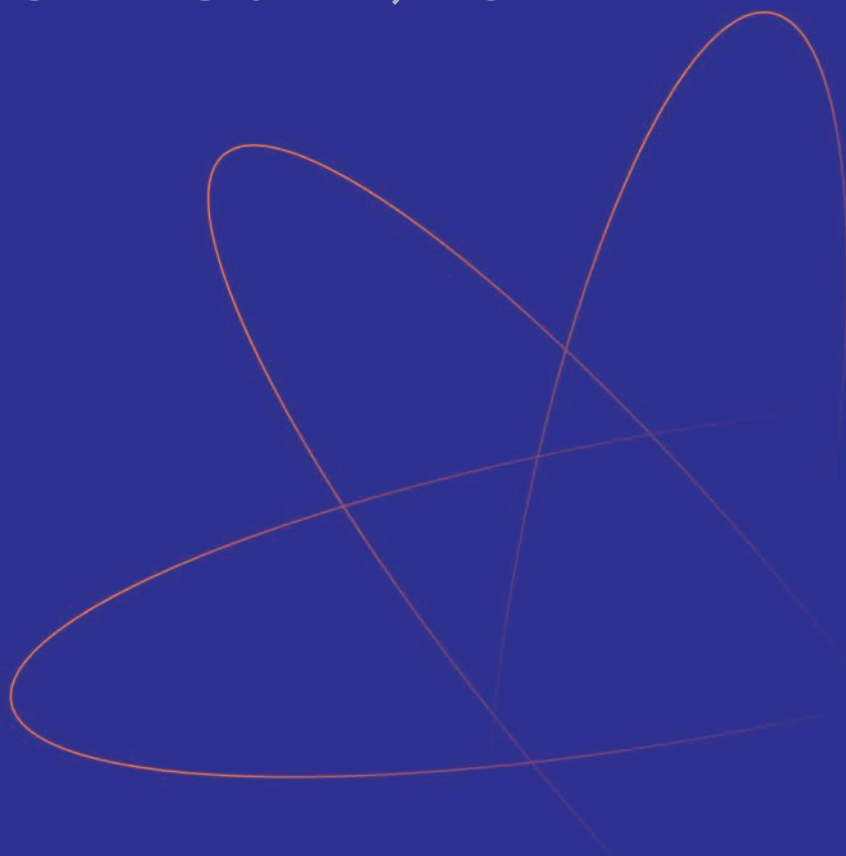


ISSN 1998-426X (print)
ISSN 2409-9082 (online)

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

ТОМ 15 № 4, 2022



**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», 2022

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

RADIATIONNAYA GYGIENA

Председатель редакционного совета
Г.Г. Онищенко

Главный редактор
И.К. Романович



Том 15 № 4, 2022

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)

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

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



Vol. 15 № 4, 2022

RADIATION HYGIENE

Vol. 15 № 4, 2022

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. Alekhovich – Russian Medical Academy of Post-graduate Education, MD, Professor (Moscow, Russian Federation)

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

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

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

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

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

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 (Malmo, Sweden)

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Том 15 № 4, 2022

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

Шарагин П.А., Шишкина Е.А., Толстых Е.И., Дёгтева М.О.
Влияние детализации трабекулярной структуры
фантомов кости на оценку дозы облучения костного
мозга от $^{89\text{Sr}}$7

Соснина С.Ф., Окатенко П.В., Сокольников М.Э.
Последствия преконцептивного облучения родителей:
эндокринно-обменная патология у потомков.....15

Чипига Л.А., Водоватов А.В., Петрякова А.В., Звонова И.А.,
Станжевский А.А., Майстренко Д.Н., Вазенина Д.А., Сысоев Д.С.
Обоснование дифференцированного подхода
к обращению с биологическими отходами пациентов
в подразделениях ядерной медицины.....34

Фесенко С.В., Прудников П.В., Емлютина Е.С., Епифанова И.Э.,
Шубина О.А.
Динамика содержания ^{137}Cs в сельскохозяйственной
продукции Брянской области после аварии на ЧАЭС:
зерно, картофель и овощи.....45

Пышкина М.Д., Жуковский М.В., Васильев А.В., Екидин А.А.,
Назаров Е.И., Романова М.А., Аникин М.Н.
Характеристика нейтронных полей на исследовательских
ядерных реакторах бассейного типа.....58

Голиков В.Ю.
Коэффициенты перехода от индивидуального
эквивалента дозы $\text{Hp}(10)$ к эффективной дозе в полях
фотонного излучения и их использование при разработке
моделей профессионального облучения.....69

Баталов В.Р., Соколова А.Б., Ефимов А.В., Джунушалиев А.Б.
Оценка применимости метода масс-спектрометрии
с индуктивно связанной плазмой для задач специального
индивидуального дозиметрического контроля.....77

Востротин В.В., Янов А.Ю.
Оценка уровня годового поступления трития в воздух
с поверхности озера Кызылташ.....88

Поливкина Е.Н., Сысоева Е.С., Романенко Е.В., Субботина Л.Ф.,
Паницкий А.В., Жамалдинов Ф.Ф., Кенжина Л.Б.
Инкорпорирование трития культурами перца и баклажана
при кратковременном воздействии окиси трития.....97

ЕСКИД И РАДИАЦИОННО- ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ПАСПОРТИЗАЦИЯ

Барковский А.Н., Ахматдинов Руслан Р., Библин А.М., Сивенков А.Г.,
Цовьянов А.Г., Журавлева В.Г., Кувшинников С.И., Тутельян О.Е.
Облучение персонала и населения зон наблюдения
радиационных объектов в 2021 году.....106

Чипига Л.А., Ладанова Е.Р., Водоватов А.В., Звонова И.А.,
Мосунов А.А., Нурзбаева Л.Т., Рыжов С.А.
Тенденции развития ядерной медицины в Российской
Федерации за 2015–2020 гг.122

Барковский А.Н., Кормановская Т.А., Водоватов А.В., Братилова А.А.,
Тутельян О.Е., Библин А.М., Ахматдинов Руслан Р.
Формирование блока данных об уровнях облучения
населения России для включения в Государственный
доклад о состоянии санитарно-эпидемиологического
благополучия населения в Российской Федерации134

РАДИАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Репин В.С., Седнев К.А.
Метод обработки спектра при измерении детектором
 $\text{NaI}(\text{TI})$ малых уровней удельной активности ^{137}Cs
в присутствии природных радионуклидов.....142

CONTENTS

Vol. 15 № 4, 2022

RESEARCH ARTICLES

Sharagin P.A., Shishkina E.A., Tolstykh E.I., Degteva M.O.
The effect of detailing the trabecular structure of bone
phantoms on the assessment of the bone marrow dose
from $^{89\text{Sr}}$13

Sosnina S.F., Okatenko P.V., Sokolnikov M.E.
Consequences of parental preconceptional irradiation:
Endocrine-metabolic pathology in offspring15

Chipiga L.A., Vodovатов A.V., Petryakova A.V., Zvonova I.A.,
Stanzhevsky A.A., Maistrenko D.N., Vazhenina D.A., Sysoev D.S.
Justification of differential approach to management
of patient biological waste in nuclear medicine
departments42

Fesenko S.V., Prudnikov P.V., Emlyutina E.S., Epifanova I.E.,
Shubina O.A.
Dynamics of ^{137}Cs concentrations in agricultural products
after the Chernobyl accident: cereals, potato,
and vegetables56

Pyshkina M.D., Zhukovsky M.V., Vasilyev A.V., Ekin A.A.,
Nazarov E.I., Romanova M.A., Anikin M.N.
Characteristics of neutron fields at pool-type research
nuclear reactors.....66

Golikov V.Yu.
The conversion coefficients from $\text{Hp}(10)$ to effective dose
in the fields of photon radiation and their use
in the development of occupational exposure models75

Batalov V.R., Sokolova A.B., Efimov A.V., Dzhunushaliev A.B.
Evaluation of the applicability of the inductively coupled
plasma mass spectrometry method for special individual
dosimetry monitoring.....85

Vostrotin V.V., Yanov A.Yu.
Assessment of the level of annual intake of tritium
into the air from the surface of the lake Kyzyltash.....95

Polivkina E.N., Sysoyeva E.S., Romanenko E.V., Subbotina L.F.,
Panitskiy A.V., Zhamalidinov F.F., Kenzhina L.B.
Incorporation of tritium by pepper and eggplant cultures
with short-term exposure
to tritium oxide103

ISDCR AND RUSSIAN FEDERATION RADIATION-HYGIENE PASSPORTIZATION

A.N. Barkovsky, Ruslan R. Akhmatdinov, A.M. Biblin, A.G. Sivenkov,
A.G. Tsovyanov, V.E. Zhuravleva, S.I. Kuvshinnikov, O.E. Tutelyan
Radiation exposure of personnel and public of radiation
control areas of radiation hazardous facilities
in the Russian Federation in 2021120

L.A. Chipiga, E.R. Ladanova, A.V. Vodovатов, I.A. Zvonova,
A.A. Mosunov, L.T. Naurzbaeva, S.A. Ryzhov
Trends in the development of nuclear medicine
in the Russian Federation for 2015–2020.....131

Barkovsky A.N., Kormanovskaya T.A., Vodovатов A.V., Bratilova A.A.,
Tutelyan O.E., Biblin A.M., Akhmatdinov Ruslan R.
Management of data on the exposure of the Russian
population for the State report on evaluation
of sanitary-epidemiological well-being of the public
in the Russian Federation.....140

RADIATION MEASUREMENT

Repin V.S., Sednev K.A.
Spectrum processing method for measuring low levels
of specific activity of ^{137}Cs with a $\text{NaI}(\text{TI})$ detector in the
presence of natural radionuclides147

СОДЕРЖАНИЕ

Том 15 № 4, 2022

РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОГО НАСЛЕДИЯ

*Библин А.М., Храмцов Е.В., Репин В.С., Иванов С.А.,
Варфоломеева К.В., Седнев К.А., Богомолова Ю.М.*

**Радиационная обстановка в районе проведения
мирного ядерного взрыва «Пирит» 149**

ЮБИЛЕЙ

Генриэтта Владимировна Архангельская

**(к 65-летию юбилею трудовой деятельности
в ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева) 162**

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА

«РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА» 164

CONTENTS

Vol. 15 № 4, 2022

RADIATION SAFETY DURING THE DECOMMISSIONING OF HERITAGE SITES

*Biblin A.M., Khramtsov E.V., Repin V.S., Ivanov S.A.,
Varfolomeeva K.V., Sednev K.A., Bogomolova Yu.M.*

**Radiation situation at the “Pirit” peaceful underground
nuclear explosion site..... 149**

ANNIVERSARY

Henrietta Vladimirovna Arkhangelskaya

**(to the 65th anniversary of labor activity
at FBUN NIIRG them. P.V. Ramzaev) 162**

JOURNAL OF RADIATION HYGIENE –

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS..... 164

Влияние детализации трабекулярной структуры фантомов кости на оценку дозы облучения костного мозга от $^{89,90}\text{Sr}$

П.А. Шарагин¹, Е.А. Шишкина^{1,2}, Е.И. Толстых¹, М.О. Дёгтева¹

¹Уральский научно-практический центр радиационной медицины, Федеральное медико-биологическое агентство, Челябинск, Россия

²Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

В настоящее время существует 2 основных подхода к созданию вычислительных фантомов для костной дозиметрии. В рамках первого подхода микроархитектура заполняющей фантомы спонгиозы включает отдельно трабекулы и отдельно костный мозг, т.е. ткань-источник и ткань-детектор разделены. Второй подход заключается в моделировании костной ткани как гомогенной среды, в которой трабекулярная кость и костный мозг объединены. Результатами моделирования в обоих случаях являются коэффициенты конверсии, которые позволяют преобразовывать удельную активность инкорпорированных радионуклидов в поглощенную в костном мозге дозу. Моделирование скелета необходимо для дозиметрии облученного населения р. Теча от инкорпорированных $^{89,90}\text{Sr}$. С этой целью были созданы фантомы, включающие описание микроструктуры спонгиозы для людей разного пола и возраста. Для внутриутробной дозиметрии были разработаны фантомы плода и беременной женщины, которые предполагают моделирование кости как гомогенной среды. Использование двух принципиально разных подходов к костной дозиметрии для пре- и постнатального периода ставит вопрос об их совместимости. Цель: оценить влияние детализации трабекулярной структуры фантомов кости на оценку коэффициентов конверсии облучения костного мозга от $^{89,90}\text{Sr}$. В рамках данной работы были сгенерированы фантомы 8 участков скелета новорожденного, занятых спонгиозой. Для каждого участка скелета было сгенерировано по одному фантому с детальным описанием микроструктуры спонгиозы и по одному фантому, в котором трабекулярная кость смоделирована как гомогенная среда. Для всех фантомов была проведена имитация транспорта излучений от инкорпорированных в ткани – источнике $^{89,90}\text{Sr}$ с использованием программы MCNP 6.2 и рассчитаны значения коэффициентов конверсии. В результате было получено 16 коэффициентов конверсии для всех фантомов. Коэффициенты конверсии, полученные для фантомов с гомогенной спонгиозой, превышают таковые для фантомов с детальным описанием микроструктуры в среднем в 2,4 раза. Такие значительные различия между результатами моделирования позволяют сделать вывод, что детализация трабекулярной структуры фантомов кости оказывает существенное влияние на оценку дозы облучения костного мозга от инкорпорированных $^{89,90}\text{Sr}$.

Ключевые слова: вычислительные фантомы, внутреннее облучение, красный костный мозг, стронций-90.

Введение

Одной из важных задач дозиметрических исследований, проводимых для облученного населения, проживающего на загрязненных территориях реки Течи (Челябинская область, Россия), является оценка доз облучения костного мозга, так как именно с дозой облучения костного мозга связано увеличение риска развития лейкозов у жителей прибрежных территорий, что было показано в эпидемиологических исследованиях [1, 2]. Загрязнение территории произошло в 1950-е гг., и основными источниками облучения костного мозга являются ^{89}Sr , ^{90}Sr , которые накапливаются в костной ткани. На реке Тече радиационному воздействию подверглись

люди всех возрастов, включая новорожденных детей. Кроме того, через организм матери изотопы стронция проникали через плаценту, накапливаясь в скелете плода, что приводило к внутриутробному облучению костного мозга. В этом контексте важной задачей является дозиметрическое моделирование скелета для расчета коэффициентов конверсии (K), позволяющих перейти от удельной активности $^{89,90}\text{Sr}$, инкорпорированных в минерализованной костной ткани к дозе в костном мозге. В настоящее время существует 2 основных подхода к описанию геометрии взаиморасположения тканей – источников и тканей – детекторов при моделировании костей скелета, на основе которых генерируются вычислительные фантомы.

Шарагин Павел Алексеевич

Уральский научно-практический центр радиационной медицины

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

Первый подход основан на детальном описании костной микроархитектуры, включающей отдельно трабекулы (ткань-источник) и отдельно костный мозг (ткань-детектор). Совокупность трабекулярной кости и мягких тканей, находящихся в её полостях, называют термином «Спонгиоза» [3], который будет использоваться далее. Таким образом, первый подход включает детальное описание спонгиозы (ДС [DS]). Второй подход – генерирование фантома кости без учета микроструктуры спонгиозы, где кость – это гомогенная среда (ГС [HS]), в которой сплошная спонгиоза объединена с кортикальной костью, и эта единая среда является как источником, так и мишенью [4–7].

В рамках первого подхода существует несколько способов моделирования формы костей и их микроструктуры. Один из них основан на анализе изображений, полученных с использованием компьютерной микротомографии (микро-КТ) аутопсийного материала. Это метод парных изображений, в рамках которого данные микро-КТ спонгиозы вписываются в объем фантома, соответствующий форме кости, полученный с помощью компьютерной томографии (КТ) с более низким разрешением [8–11]. Другой метод использует КТ-изображения спонгиозы с фильтрацией шумов, имитируя случайную текстуру микроструктуры. Такие модели называются текстурированными [12]. Оба метода требуют наличия аутопсийного материала, вследствие чего являются дорогостоящими и трудоемкими, а параметры фантомов, полученных с использованием этих методов, основаны, как правило, на анализе ограниченного количества биоматериала. Это не гарантирует репрезентативности и не позволяет оценить неопределенности результатов моделирования, связанные с популяционной вариабельностью размеров костей и параметров микроархитектуры скелета. В качестве альтернативы был разработан оригинальный способ параметрического моделирования – SPSPD-моделирование (Stochastic Parametric Skeletal Dosimetry) [13, 14]. Генерируемые в рамках этого подхода фантомы представляют собой трехмерные воксельные модели простой геометрической формы (цилиндр, прямоугольный параллелепипед, эллипсоид и т.п.). В рамках SPSPD-моделирования (как при частном случае ДС-подхода) фантомы включают в себя трабекулярную кость, состоящую из трехмерной сети стержневидных костных трабекул, и костный мозг, расположенный между ними, а также имеют внешний слой кортикальной кости. Набор таких фантомов используется для моделирования целой кости. Литературные морфометрические данные используются в качестве параметров модели [15]. Для генерации вычислительных фантомов разработана компьютерная программа, позволяющая легко создавать наборы моделей с варьирующими параметрами микро- и макроархитектуры [16]. Именно этот вариант моделирования был использован для оценок K от $^{89,90}\text{Sr}$ для жителей прибрежных сел реки Течи разного пола и возраста: новорожденный, 1 год, 5 лет, 10 лет, 15 лет, взрослые [13], то есть для постнатального периода.

Второй подход, использующий приближение гомогенности костной ткани, много проще с точки зрения генерирования фантомов и чаще применяется в дозиметрии гамма- и нейтронного излучения [4, 5], но также применяется для дозиметрии $^{89,90}\text{Sr}$ [6,7]. В частности, в Университете Флориды специально для оценки доз внутриутробного облучения от $^{89,90}\text{Sr}$ для жителей Уральского

региона были разработаны 8 моделей беременной женщины и плода на разных сроках (8, 12, 18, 22, 26, 30, 34 и 38 недель), в которых скелет описывался как гомогенная среда [6,7]. Расчеты коэффициентов конверсии, полученные на основе этих фантомов, были использованы для предварительных оценок доз внутриутробного облучения. Однако возникает вопрос, насколько правомерно использовать ГС-подход при для костной дозиметрии и можно ли объединить названные подходы в одной дозиметрической системе для жителей прибрежных территорий реки Течи, которые подвергались как внутриутробному, так и постнатальному облучению.

Чтобы ответить на этот вопрос, в рамках настоящей работы проводится сравнение этих двух подходов с использованием уже имеющегося SPSPD-фантома новорожденного (как наиболее близкого к внутриутробному) и его абсолютного геометрического аналога, но с гомогенной спонгиозой.

Цель исследования – оценить влияние детализации трабекулярной структуры фантомов кости на оценку коэффициентов конверсии облучения костного мозга от $^{89,90}\text{Sr}$. Для этого были сопоставлены K , полученные для вычислительных фантомов, имитирующих участки костей с гомогенной (ГС) и негомогенной (SPSPD) спонгиозой, при одинаковых форме, массе и средней плотности фантомов.

Материалы и методы

В рамках данной работы были сгенерированы фантомы 8 участков скелета новорожденного, занятых спонгиозой.

Каждый фантом описывается простой геометрической формой (цилиндр, эллипсоид, прямоугольный параллелепипед и др.). Размеры этих геометрических тел соответствуют размерам участков кости новорожденных, занятых трабекулярными структурами (размер участка кости за вычетом кортикального слоя, если таковой имелся) [17,18]. Размеры и параметры микроархитектуры участков костей получены на основе опубликованных данных. Так, например, параметры фантома тела грудного позвонка новорожденного получены на основе анализа данных литературы (4 публикации) [19–21]. Критерии отбора опубликованных данных, а также переход от размеров костей к параметрам фантома был подробно описан в предыдущих публикациях [17,18]. Параметры каждого фантома включают линейные размеры и параметры трабекулярной микроструктуры: толщину трабекул ($Tb.Th$), размер межтрабекулярного пространства ($Tb.Sp$), долю костной ткани в общем объеме спонгиозы (BV/TV). Параметры фантомов, моделируемых в рамках данной работы, представлены в таблице 1.

Элементный состав сред, в которых осуществлялся транспорт излучений, представлен в таблице 2.

Плотность минерализованной кости (ρ_{bone}) новорожденного принималась равной $1,65 \text{ г/см}^3$ [24], а плотность костного мозга (ρ_{BM}) – 1 г/см^3 [25].

Для каждой из 8 геометрических форм (см. табл. 1) было сгенерировано 2 фантома одинаковой массы, где спонгиоза моделировалась с помощью SPSPD-подхода (SPSPD-фантом) и в приближении гомогенной спонгиозы (ГС-фантом). На рисунке продемонстрирована схема ге-

Параметры фантомов, имитирующих участки скелета новорожденного, занятые спонгиозой

Таблица 1

[Table 1]

The parameters of the phantoms, imitating spongiosa regions of newborn skeleton

Форма фантома: характеристика размеров [Shape of phantom, size characteristics]	Обозначение [Designation]	Линейные размеры, мм [Linear dimensions, mm]	Tb.Th, мм [mm]	Tb.Sp, мм [mm]	BV/TV, %	Масса спонгиозы, г [Spongiosa mass, g]	Участок кости, занятый спонгиозой [Bone region occupied by spongiosa]
Прямоугольный параллелепипед: высота × длина × толщина [Rectangular parallelepiped: height × length × thickness]	П1 [P1]	2,0×30,0×30,0	0,29	0,57	53	2,42	Участок кости черепа [Region of skull bone]
	П2 [P2]	2,3×23,9×23,9	0,17	0,32	31	1,59	Участок подвздошной кости [Region of iliac bone]
	П3 [P3]	5,0×30,0×2,5	0,14	0,52	19	0,40	Участок ребра [Region of rib]
Прямой цилиндр с эллиптическим основанием: высота × Д1 × Д2 [Straight cylinder with elliptical base: height × D1 × D2]	Ц1 [C1]	7,1×17,5×11,3	0,17	0,32	31	1,41	Участок седалищной кости [Region of ischium bone]
	Ц2 [C2]	5,1×7,6×10,6	0,1	0,6	45	0,42	Тело грудного позвонка [Thoracic vertebra body]
	Ц3 [C3]	30,0×3,8×3,8	0,11	0,39	37	0,42	Участок диафиза бедренной кости [Region of femur diaphysis]
Деформированный цилиндр: высота × Д1 × Д2 × Д3 × Д4 [Deformed cylinder: height × D1 × D2 × D3 × D4]	ДЦ [DC]	18,9×25,4×10,6×6,2×6,2	0,11	0,39	37	2,66	Дистальная часть бедренной кости [Distal part of femur]
Эллипсоид: ось 1 × ось 2 [Ellipsoid: axis 1 × axis 2]	Э [E]	6,8×11,2	0,12	0,48	22	0,38	Таранная кость [Talus bone]

Д – диаметр.

Химический состав минерализованной костной ткани и костного мозга, используемый для моделирования [23]

Таблица 2

[Table 2]

The chemical composition of mineral bone and bone marrow, used for modelling [23]

Элемент [Element]	Массовая доля [Mass fraction], %		
	Костная ткань [Mineral bone]	Костный мозг [Bone marrow]	Гомогенная спонгиоза [Homogeneous spongiosa]
H	4,2	11,0	7,6
C	16,0	–	8,0
N	4,5	–	2,2
O	50,2	89,0	69,6
Mg	0,3	–	0,15
P	8,0	–	0,4
S	0,3	–	0,1
Ca	16,5	–	8,5

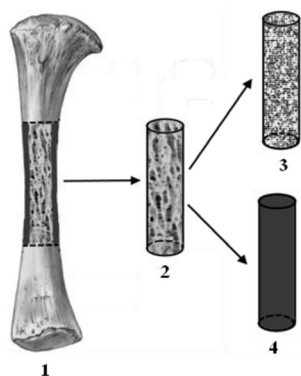


Рис. Схема моделирования участка бедренной кости новорожденного: 1 – бедренная кость; 2 – участок трубки (диафиза) кости, занятый спонгиозой, моделируется цилиндром; 3 – SPSD-фантом с моделированием трабекул в виде стержней; 4 – ГС-фантом с гомогенной спонгиозой
[Fig. The scheme of modeling a section of the femur of a newborn: 1 – the femur; 2 – the section of the bone diaphysis occupied by the spongiosa is modeled by a cylinder; 3 – SPSD-phantom with modeling of rod-like trabeculae; 4 – HS-phantom with homogeneous spongiosa]

нерирования фантомов на примере участка бедренной кости новорожденного.

SPSD-моделирование проводили с использованием программы Trabecula [16]. В результате для каждого участка кости из таблицы 1 были сгенерированы трёхмерные воксельные фантомы [17, 26]. Параметры моделируемых фантомов представлены в таблице 1, химический состав костной ткани и костного мозга представлен в таблице 2. Размер вокселя выбирался как 50–75% размера наименьшей моделируемой структуры, т.е. толщины трабекулы ($Tb.Th$), и варьировал от 0,07 мм до 0,2 мм.

В рамках ГС-подхода фантомы описывались аналитическими поверхностями. Линейные размеры, масса и форма ГС-фантомов были взяты такими же, как для SPSD фантомов (см. табл. 1). Внутри фантомы заполнены гомогенной спонгиозой, включающей трабекулярную кость и костный мозг, химический состав гомогенной спонгиозы представлен в таблице 2. Плотность гомогенной спонгиозы (ρ_{hs}) для ГС-фантомов рассчитывалась следующим образом:

$$\rho_{hs} = \frac{BV}{TV} * \rho_{bone} + \left(1 - \frac{BV}{TV}\right) \times \rho_{BM}, \quad (1)$$

где:

ρ_{bone} – плотность минерализованной костной ткани;

ρ_{BM} – плотность костного мозга.

Таким образом достигалось равенство масс фантомов при двух подходах к моделированию.

Расчет транспорта излучений проводился в приближении, что источник $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ (суммарный спектр) и ^{89}Sr (спектр) равномерно распределены в тканях-источниках:

1) костных трабекулах (для SPSD-фантомов);

2) во всей гомогенной спонгиозе (для ГС-фантомов).

Тканью-детектором в первом случае является костный мозг, а во втором – вся гомогенная спонгиоза. Расчет поглощенных в ткани-детекторе энергии на единичный распад радионуклида в ткани-источнике проводился для каждого сегмента по-отдельности с использованием лицензионной программы MCNP 6.2, после чего произво-

дился расчет коэффициентов для конвертации удельной активности $^{89,90}\text{Sr}$ инкорпорированных в объеме ткани-источника в единицы мощности поглощенной дозы в красном костном мозге (ткани-детекторе), т.е. коэффициентов конверсии (K), $(\text{Гр с}^{-1})/(\text{Бк г}^{-1})$; K рассчитывались следующим образом:

$$K = \frac{E}{m_T} \times m_S, \quad (2)$$

где:

E – энергия, поглощенная в ткани-детекторе на единичный распад материнского радионуклида в ткани источнике;

m_T – масса ткани-детектора в фантоме;

m_S – масса ткани-источника в фантоме;

Для ГС-фантомов $m_T = m_S$.

Результаты и обсуждение

В рамках данной работы было сгенерировано 8 фантомов, имитирующих участки спонгиозы в составе костей новорожденного, в приближении гомогенной спонгиозы, и 8 фантомов, имитирующих микроархитектуру костной ткани. Для каждого фантома был проведен расчет K . Коэффициенты конверсии для SPSD и ГС фантомов представлены в таблице 3.

Как видно из таблицы 3, коэффициенты конверсии, рассчитанные в приближении гомогенной спонгиозы, систематически выше таковых, рассчитанных с помощью SPSD-подхода. Отношение $K_{ГС}/K_{SPSD}$ варьирует в диапазоне 1,6–3,4 и в среднем составляет 2,4. Более высокие значения коэффициентов конверсии, рассчитанных в приближении гомогенной спонгиозы, ожидаемы и легко объяснимы. При использовании ГС-подхода ткань-источник и ткань-детектор совпадают, поэтому потеря энергии излучения $^{89,90}\text{Sr}$ происходит только за счет выхода электронов из объема фантома. При SPSD-подходе часть энергии от инкорпорированных в трабекулах $^{89,90}\text{Sr}$ поглощается в них же (ткани-источнике), не формируя дозу в костном мозге. Очевидно, что SPSD-подход дает более точные оценки K . Увеличение K более чем в 2 раза при ГС-подходе может привести к неоправданному завышению доз облучения красного костного мозга при равном эффекте облучения и, как следствие, – к недооценке радиационных рисков. Как следует из анализа таблицы 1, отношение $K_{ГС}/K_{SPSD}$ зависит от параметра BV/TV : чем больше доля костной ткани в спонгиозе, тем более она гомогенна и тем меньше разница между 2 результатами моделирования. Основные факторы, влияющие на формирование дозы в красном костном мозге в моделях с детализированной микроструктурой, более подробно описаны в работах [27, 28].

Обобщая все вышесказанное, можно сказать, что детализация трабекулярной структуры фантомов кости оказывает существенное влияние на оценку дозы облучения костного мозга от инкорпорированных $^{89,90}\text{Sr}$, из чего следует, что использование существующих фантомов, базирующихся на ГС-подходе [6, 7] для оценок доз внутриутробного облучения жителей Уральского региона, при поступлении $^{89,90}\text{Sr}$ в организм беременной женщины приводят к их завышению. Поэтому в качестве продолжения нашей работы мы планируем создание дозиметрических фантомов скелета плода с использованием SPSD-

Таблица 3

Сопоставление значений $K ((\text{Гр} \times \text{с}^{-1})/(\text{Бк} \times \text{г}^{-1}) \times 10^{10})$, полученных с помощью SPSD- и ГС-подходов для всего набора фантомов

[Table 3

Comparison of the values of $K ((\text{Gy} \times \text{s}^{-1})/(\text{Bq} \times \text{g}^{-1}) \times 10^{10})$, obtained using SPSD and HS approaches for the whole set of phantoms]

Фантом [Phantom]	$^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$			^{89}Sr		
	K_{SPSD}	$K_{\text{ГС}}$	$K_{\text{ГС}}/K_{\text{SPSD}}$	K_{SPSD}	$K_{\text{ГС}}$	$K_{\text{ГС}}/K_{\text{SPSD}}$
П1 [P1]	0,62	1,02	1,64	0,39	0,61	1,58
П2 [P2]	0,46	1,23	2,65	0,28	0,72	2,54
П3 [P3]	0,24	0,82	3,43	0,15	0,41	2,71
Ц1 [C1]	0,56	1,32	2,37	0,33	0,76	2,32
Ц2 [C2]	0,67	1,03	1,55	0,40	0,63	1,55
Ц3 [C3]	0,53	1,41	2,67	0,33	0,79	2,40
ДЦ [DC]	0,70	1,72	2,45	0,40	0,91	2,26
Э [E]	0,37	1,01	2,77	0,22	0,62	2,80

моделирования. Это будет сделано, чтобы обеспечить единый подход к дозиметрии костного мозга и избежать переоценки доз в период внутриутробного облучения.

Заключение

Коэффициенты конверсии, рассчитанные в приближении гомогенной спонгиозы, превышают таковые, рассчитанные с учетом микроархитектуры кости, в 1,6–3,4 раза. Такие значительные различия между результатами моделирования позволяют сделать вывод, что детализация трабекулярной структуры фантомов кости оказывает существенное влияние на оценку дозы облучения костного мозга от инкорпорированных $^{89,90}\text{Sr}$.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Шарагин П.А. – написание статьи, дизайн исследований;

Шишкина Е.А. – разработка концепции, редактирование статьи;

Толстых Е.И. – редактирование статьи;

Дёгтева М.О. – разработка основной концепции, редактирование статьи.

Благодарности

Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам за проделанную работу.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Финансирование работы осуществлялось в рамках федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года» НИОКР.

Литература

1. Krestinina L.Yu., Davis F.G., Schonfeld S., et al. Leukaemia incidence in the Techa River Cohort: 1953–2007 // *British Journal of Cancer*. 2013. Vol. 109. P. 2886–2893. DOI: 10.1038/bjc.2013.614. PubMed PMID: 24129230; PubMed Central PMCID: PMC3844904.

2. Preston D.L., Sokolnikov M.E., Krestinina L.Y., et al. Estimates of Radiation Effects on Cancer Risks in the Mayak Worker, Techa River and Atomic Bomb Survivor Studies // *Radiation Protection Dosimetry*. 2017. Vol. 173, No 1-3. P. 26-31. DOI: 10.1093/rpd/ncw316. PubMed PMID: 27885076.

3. ICRP, 2009. Adult reference computational phantoms. ICRP Publication 110. Ann. ICRP 39(2).

4. Cristy M., Eckerman K.F. Specific Absorbed Fractions of Energy at Various Ages from Internal Photon Sources. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory. 1987. ORNL/TM-8381. Vol. 1-6.

5. Han E., Bolch W., Eckerman K. Revisions to the ORNL series of adult and pediatric computational phantoms for use with the MIRDO schema // *Health Physics*. 2006. Vol. 90. No 4. P. 337-56.

6. Maynard M.R., Shagina N.B., Tolstykh E.I., et al. Fetal organ dosimetry for the Techa River and Ozyorsk offspring cohorts, part 1: Urals-based series of fetal computational phantoms // *Radiation and Environmental Biophysics*. 2015. Vol. 54, No 1. P. 37-46. DOI:10.1007/s00411-014-0571-4.

7. Maynard M.R., Shagina N.B., Tolstykh E.I., et al. Fetal organ dosimetry for the Techa River and Ozyorsk Offspring Cohorts, part 2: radionuclide S values for fetal self-dose and maternal cross-dose // *Radiation and Environmental Biophysics*. 2015. Vol. 54, No 1. P. 47-59. DOI:10.1007/s00411-014-0570-5.

8. Hough M., Johnson P., Rajon D., et al. An image-based skeletal dosimetry model for the ICRP reference adult male—internal electron sources // *Physics in Medicine and Biology*. 2011. Vol. 56, No 8. P. 2309–46. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/56/8/001> PMID: 21427487.

9. Bolch W.E., Eckerman K., Endo A., et al. ICRP Publication 143: Paediatric Reference Computational Phantoms // *Annals of the ICRP*. 2020. Vol. 49, No 1. P. 5–297. <https://doi.org/10.1177/0146645320915031> PMID: 33000625

10. Pafundi D., Lee C., Watchman C., et al. An image-based skeletal tissue model for the ICRP reference newborn // *Physics in Medicine and Biology*. 2009. Vol. 54, No 14. P. 4497–531. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/54/14/009> PMID: 19556686.

11. Shah A.P., Jokisch D.W., Rajon D.A., et al. Chord-based versus voxel-based methods of electron transport in the skeletal tissues // *Medical Physics*. 2005. Vol. 32, No 10. P. 3151-9. DOI: 10.1118/1.2040712. PubMed PMID: 16279069

12. Abadi E., Segars W.P., Sturgeon G.M., et al. Modeling “Textured” Bones in Virtual Human Phantoms // *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences*. 2019. Vol. 3, No 1. P. 47–53.

13. Degteva M.O., Tolstykh E.I., Shishkina E.A., et al. Stochastic Parametric Skeletal Dosimetry model for humans: General description // PLoS ONE. 2021. Vol. 16, No 10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257605>
14. Дёгтева М.О., Шишкина Е.А., Толстых Е.И., и др. Методологический подход к разработке дозиметрических моделей скелета человека для бета-излучающих радионуклидов // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2. С. 66-75. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-2-66-75>.
15. Shishkina E.A., Zalyapin V.I., Timofeev Yu.S., et al. Parametric stochastic model of bone structures to be used in computational dosimetric phantoms of human skeleton // Radiation & Applications. 2018. Vol. 3, No 2. P. 133-137.
16. Shishkina E.A., Timofeev Y.S., Volchkova A.Yu., et al. Trabecula: A Random Generator of Computational Phantoms for Bone Marrow Dosimetry // Health Physics. 2020. Vol. 118, No 1. P. 53-9. DOI: 10.1097/hp.0000000000001127. PMID: 31764420.
17. Шарагин П.А., Толстых Е.И., Шишкина Е.А., и др. Дозиметрическое моделирование кости для остеотропных бета-излучающих радионуклидов: размерные параметры и сегментация. Материалы международной научной конференции «Современные проблемы радиобиологии». Беларусь, Гомель, 23-24 сентября 2021. С. 200-204.
18. Толстых Е.И., Шарагин П.А., Шарагин П.А., и др. Формирование доз облучения красного костного мозга человека от $^{89,90}\text{Sr}$, оценка параметров трабекулярной кости для дозиметрического моделирования. Материалы международной научной конференции «Современные проблемы радиобиологии». Беларусь, Гомель, 23-24 сентября 2021. С. 176-179.
19. Acquah F., Robson Brown K.A., Ahmed F. Early Trabecular Development in Human Vertebrae: Overproduction, Constructive Regression, and Refinement // Frontiers in Endocrinology. 2015. Vol. 6, No 67. DOI: 10.3389/fendo.2015.00067.
20. Kneissel M., Roschger P., Steiner W., et al. Cancellous Bone Structure in the Growing and Aging Lumbar Spine in a Historic Nubian Population // Calcified Tissue International. 1997. No 61. P. 95-100.
21. Ponrartana S., Aggabao P.C., Dharmavaram N.L., et al. Sexual Dimorphism in Newborn Vertebrae and its Potential Implications // The Journal of Pediatrics. 2015. No 167. P. 416-21.
22. Pafundi D. Image-based skeletal tissue and electron dosimetry models for the ICRP reference pediatric age series Biomedical Engineering. PhD Dissertation. University of Florida, 2009.
23. ICRP, 2002. Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference Values. ICRP Publication 89. Ann. ICRP 32(3-4).
24. Robinson R.A. Chemical analysis and electron microscopy of bone // Bone as a Tissue. In: Rodahl K., Nicholson J.T., Brown E.M., editor. Bone as a Tissue. New York: McGraw-Hill Book Company, 1960. P. 186-250.
25. Tissue Properties Database V4.0. URL: <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/elements> (Дата обращения: 15.05.2018.)
26. Zalyapin V., Timofeev Yu., Shishkina E. A parametric stochastic model of bone geometry // Bulletin of the South Ural State University Ser Mathematical Modelling, Programming & Computer Software (Bulletin SUSU MMCS). 2018. Vol. 11. P. 44-57. DOI: 10.14529/mmp180204.
27. Volchkova A.Yu., Sharagin P.A., Shishkina E.A. Internal bone marrow dosimetry: the effect of the exposure due to ^{90}Sr incorporated in the adjacent bone segments // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software (Bulletin SUSU MMCS). (In press).
28. Шишкина Е.А., Шарагин П.А., Волчкова А.Ю. Аналитическое описание дозообразования в костном мозге от ^{90}Sr , инкорпорированного в кальцифицированных тканях // Вопросы радиационной безопасности. 2021. № 3. С. 72-82.

Поступила: 30.05.2022 г.

Шарагин Павел Алексеевич – младший научный сотрудник биофизической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России. **Адрес для переписки:** 454076, Россия, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: sharagin@urcrf.ru

Шишкина Елена Анатольевна – доктор биологических наук, старший научный сотрудник биофизической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия

Толстых Евгения Игоревна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник биофизической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия

Дёгтева Марина Олеговна – кандидат технических наук, заведующая биофизической лабораторией Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия

Для цитирования: Шарагин П.А., Шишкина Е.А., Толстых Е.И., Дёгтева М.О. Влияние детализации трабекулярной структуры фантомов кости на оценку дозы облучения костного мозга от $^{89,90}\text{Sr}$ // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С.7-14. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-7-14

The effect of detailing the trabecular structure of bone phantoms on the assessment of the bone marrow dose from $^{89,90}\text{Sr}$

Pavel A. Sharagin ¹, Elena A. Shishkina ^{1,2}, Evgenia I. Tolstykh ¹, Marina O. Degteva ¹

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

²Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

Today there exist two main approaches to developing computational phantoms for bone dosimetry. The first approach is based on a detailed description of the microarchitecture of the spongiosa filling the phantoms. This microarchitecture includes trabeculae and bone marrow separately, i.e., the source tissue and the detector tissue are separated. The second approach involves generating a homogeneous bone where the target and source tissues are combined. In both cases the simulation results are conversion factors that allow converting the specific activity of incorporated radionuclides into the absorbed dose in the bone marrow. For dosimetry of the Techa River population exposed due to incorporated $^{89,90}\text{Sr}$, the skeletal phantoms were created for people of different sex and age, starting with a newborn. These phantoms included a detailed description of the trabecular bone microstructure, i.e., they belong to the first approach. Also, phantoms of the skeleton of the fetus and pregnant woman at various gestation stages have been developed, which involves modeling the bone as a homogeneous medium. These phantoms are designed for dosimetry of external and internal exposure, including $^{89,90}\text{Sr}$ dosimetry. The usage of two fundamentally different approaches to bone dosimetry for the pre- and postnatal period raises the issue of compatibility of these approaches and possibility of their combining within a single dosimetric system. Objective: to evaluate the effect of detailing the trabecular structure of bone phantoms on the evaluation of conversion factors of bone marrow exposure due to $^{89,90}\text{Sr}$. Computational phantoms of eight regions of a newborn's skeleton filled in with trabecular bone were generated. For each bone region two phantoms were generated: one phantom with a detailed description of the spongiosa microstructure and one phantom with spongiosa modeled as a homogeneous media. For all phantoms, the radiation transport from $^{89,90}\text{Sr}$ incorporated in the source tissue was simulated using the MCNP 6.2 code, and the values of conversion factors were calculated. As a result, 16 conversion factors were obtained for all phantoms. On the average the conversion factors obtained for phantoms with homogeneous spongiosa exceed those for phantoms with a detailed description of the spongiosa microstructure by 2.4 times. Such significant difference between the results makes it possible to conclude that the detailing description of trabecular structure of bone phantoms has a significant impact on the assessment of the bone marrow dose due to incorporated $^{89,90}\text{Sr}$.

Key words: computational phantoms, internal exposure, red bone marrow, strontium-90.

Authors' personal contribution

Pavel A. Sharagin – article writing, research design;
Elena A. Shishkina – concept development, article editing;
Evgenia I. Tolstykh – article editing;
Marina O. Degteva – basic concept development, article editing.

Acknowledgment

The authors are grateful to anonymous reviewers for their work.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Financial support

The work was funded within the framework of the federal target program "Ensuring Nuclear and Radiation safety for 2016-2020 and for the period up to 2030" R&D.

References

1. Krestinina LYu, Davis FG, Schonfeld S, Preston DL, Degteva M, Epifanova S, et al. Leukaemia incidence in the Techa River Cohort: 1953–2007. *British Journal of Cancer*. 2013;109: 2886-2893. DOI: 10.1038/bjc.2013.614. PubMed PMID: 24129230; PubMed Central PMCID: PMC3844904.
2. Preston DL, Sokolnikov ME, Krestinina LYu, Stram DO. Estimates of Radiation Effects on Cancer Risks in the Mayak Worker, Techa River and Atomic Bomb Survivor Studies. *Radiation Protection Dosimetry*. 2017;173(1-3): 26-31. DOI: 10.1093/rpd/ncw316. PubMed PMID: 27885076.
3. ICRP, 2009. Adult reference computational phantoms. ICRP Publication 110. Ann. ICRP 39(2).
4. Cristy M, Eckerman KF. Specific Absorbed Fractions of Energy at Various Ages from Internal Photon Sources. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory. 1987. ORNL/TM-8381. Vol. 1-6.
5. Han E, Bolch W, Eckerman K. Revisions to the ORNL series of adult and pediatric computational phantoms for use with the MIRD schema. *Health Physics*. 2006;90(4): 337-56.

Pavel A. Sharagin

Urals Research Center for Radiation Medicine

Address for correspondence: Vorovsky str., 68a, Chelyabinsk, 454076, Russia; E-mail: sharagin@urcrm.ru

6. Maynard MR, Shagina NB, Tolstykh EI, Degteva MO, Fell TP, Bolch WE. Fetal organ dosimetry for the Techa River and Ozyorsk offspring cohorts, part 1: Urals-based series of fetal computational phantoms. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2015;54(1): 37-46. DOI:10.1007/s00411-014-0571-4.
7. Maynard MR, Shagina NB, Tolstykh EI, Degteva MO, Fell TP, Bolch WE. Fetal organ dosimetry for the Techa River and Ozyorsk Offspring Cohorts, part 2: radionuclide S values for fetal self-dose and maternal cross-dose. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2015;54(1): 47-59. DOI:10.1007/s00411-014-0570-5.
8. Hough M, Johnson P, Rajon D, Jokisch D, Lee Ch, Bolch W. An image-based skeletal dosimetry model for the ICRP reference adult male—internal electron sources. *Physics in Medicine and Biology*. 2011;56(8): 2309–46. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/56/8/001> PMID: 21427487.
9. Bolch WE, Eckerman K, Endo A, Hunt JGS, Jokisch DW, Kim CH, et al. ICRP Publication 143: Paediatric Reference Computational Phantoms. *Annals of the ICRP*. 2020;49(1): 5–297. DOI: 10.1177/0146645320915031.
10. Pafundi D, Lee C, Watchman C, Bourke V, Aris J, Shagina N, et al. An image-based skeletal tissue model for the ICRP reference newborn. *Physics in Medicine and Biology*. 2009;54(14): 4497–531. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/54/14/009> PMID: 19556686.
11. Shah AP, Jokisch DW, Rajon DA, Watchman ChJ, Patton PhW, Bolch WE. Chord-based versus voxel-based methods of electron transport in the skeletal tissues. *Medical Physics*. 2005;32(10): 3151-9. DOI: 10.1118/1.2040712. PubMed PMID: 16279069.
12. Abadi E, Segars WP, Sturgeon GM, Harrawood B, Kapadia A, Samei E. Modeling “Textured” Bones in Virtual Human Phantoms. *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences*. 2019;3(1): 47–53.
13. Degteva MO, Tolstykh EI, Shishkina EA, Sharagin PA, Zalyapin VI, Volchkova AYU, et al. Stochastic Parametric Skeletal Dosimetry model for humans: General description. *PLoS ONE*. 2021;16(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257605>
14. Degteva MO, Shishkina EA, Tolstykh EI, Zalyapin VI, Sharagin PA, Smith MA, et al. Methodological approach to development of dosimetric models of the human skeleton for beta-emitting radionuclides. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2): 66-75. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-2-66-75>.
15. Shishkina EA, Zalyapin VI, Timofeev YuS, Degteva MO. Parametric stochastic model of bone structures to be used in computational dosimetric phantoms of human skeleton. *Radiation & Applications*. 2018;3(2): 133-137.
16. Shishkina EA, Timofeev YS, Volchkova AYU, Sharagin PA, Zalyapin VI, Degteva MO, et al. Trabecula: A Random Generator of Computational Phantoms for Bone Marrow Dosimetry. *Health Physics*. 2020;118(1):53-59. DOI: 10.1097/HP.0000000000001127. PMID: 31764420.
17. Sharagin PA, Tolstykh EI, Shishkina EA, Napie BA, Smit MA, Degteva MO. Dosimetric modeling of bone for bone-seeking beta-emitting radionuclides: size parameters and segmentation. Proceedings of the contemporary issues of radiobiology – 2021 International Scientific Conference. Belarus, Gomel; 2021. P. 200-204 (In Russian).
18. Tolstykh EI, Sharagin PA, Shishkina EA. Dosimetric modeling of red bone marrow exposure from ^{89,90}Sr: resolving age-dependent trabecular bone parameters. Proceedings of the contemporary issues of radiobiology – 2021 International Scientific Conference. Belarus, Gomel; 2021. P. 176-179. (In Russian).
19. Acquaaah F, Robson Brown KA, Ahmed F, Jeffery N, Abel RL. Early Trabecular Development in Human Vertebrae: Overproduction, Constructive Regression, and Refinement. *Frontiers in Endocrinology*. 2015;6(67). DOI: 10.3389/fendo.2015.00067.
20. Kneissel M, Roschger P, Steiner W, Schamall D, Kalchauer G, Boyde A, et al. Cancellous Bone Structure in the Growing and Aging Lumbar Spine in a Historic Nubian Population. *Calcified Tissue International*. 1997;61: 95–100.
21. Ponrartana S, Aggabao PC, Dharmavaram NL, Fisher CL, Friedlich Ph, Devaskar ShU, et al. Sexual Dimorphism in Newborn Vertebrae and its Potential Implications. *The Journal of Pediatrics*. 2015;167: 416–21.
22. Pafundi D. Image-based skeletal tissue and electron dosimetry models for the ICRP reference pediatric age series Biomedical Engineering. PhD Dissertation. University of Florida. 2009.
23. ICRP, 2002. Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference Values. ICRP Publication 89. Ann. ICRP 32(3-4).
24. Robinson RA. Chemical analysis and electron microscopy of bone. In: Bone as a tissue. In: Rodahl K, Nicholson JT, Brown EM, editors. Bone as a Tissue. New York: McGraw-Hill Book Company; 1960: 186-250.
25. Tissue Properties Database V4.0. URL: <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/elements> (Accessed 15.05.2018.)
26. Zalyapin V, Timofeev Yu, Shishkina E. A parametric stochastic model of bone geometry. *Bulletin of the South Ural State University Ser Mathematical Modelling, Programming & Computer Software (Bulletin SUSU MMCS)*. 2018;11: 44-57. DOI: 10.14529/mmp180204.
27. Volchkova AYU, Sharagin PA, Shishkina EA. Internal bone marrow dosimetry: the effect of the exposure due to ⁹⁰Sr incorporated in the adjacent bone segments. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software (Bulletin SUSU MMCS)*. (In press).
28. Shishkina EA, Sharagin PA, Volchkova AYU. Analytical description of dose forming in bone marrow from ⁹⁰Sr incorporated in calcified tissues. *Voprosy radiacionnoj bezopasnosti =Issues of Radiation Safety*. 2021;3: 72-82 (In Russian).

Received: May 30, 2022

For correspondence: Pavel A. Sharagin – Junior Researcher of the Biophysics Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency (Vorovsky str., 68a, Chelyabinsk, 454076, Russia; E-mail: sharagin@urcrm.ru)

Elena A. Shishkina – Doctor of Biological Sciences, Senior Researcher of the Biophysics Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency, Chelyabinsk, Russia

Evgenia I. Tolstykh – Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher of the Biophysics Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency, Chelyabinsk, Russia

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

For citation: Sharagin P.A., Shishkina E.A., Tolstykh E.I., Degteva M.O. The effect of detailing the trabecular structure of bone phantoms on the assessment of the bone marrow dose from ^{89,90}Sr. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 4. P. 7-14. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-7-14

Consequences of parental preconceptional irradiation: Endocrine–metabolic pathology in offspring

Svetlana F. Sosnina, Pavel V. Okatenko, Mikhail E. Sokolnikov

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

Epidemiological studies of late effects of preconceptional (prior to conception) radiation exposure are necessary in order to understand the risks of tumor and non-tumor pathology in next generations. Research of possible relation between parental preconceptional exposure and development of endocrine and metabolic disorders in the offspring is one of the topical issues of radiation hygiene. The objective of the study: comparative analysis of endocrine and metabolic pathology in children of the individuals exposed to long term preconceptional external gamma-radiation at the Mayak Production Association – at the first atomic industry facility on Russia. Materials and methods: A retrospective research was performed based on the Ozyorsk Children's Health Registry. Ozyorsk – the city where Mayak Production Association is the enterprise forming the city. Analysis of endocrine and metabolic disorders was performed for 13880 children of 1949–1973 years of birth who were born and resided in Ozyorsk; parents of 9321 children of this number had accumulated doses of prolonged external gamma-radiation exposure at the production facility prior to conception. A comparative analysis of the structure and incidence of “Endocrine, nutritional and metabolic diseases” and nosological forms of this class of pathology was performed. Characteristic features of parental preconceptional exposure were analyzed in relation to thyroid pathology in children. Relative risk of endocrine and metabolic disorders among the children of exposed and unexposed parents was calculated for the whole disease class and for certain nosologies. Results: A significant predominance of thyroid diseases, particularly, iodine deficiencies, was detected at an earlier age among the offspring of Mayak Production Association workers compared to the control group; these cases were mostly related to low dose parental preconceptional exposure. Thyroid cancer was further detected in 0.16% (15/9321) of the studied cohort of the offspring of exposed parents with average manifestation age of 42.6. Relative risk of thyroid diseases was significantly higher among the exposed parents' offspring compared to the controls: 2.0 among boys (95% confidence interval 1.38–2.9), 1.59 among girls (1.25–2.02) and in the group as a whole – 1.64 (1.34–2.01). Relative risk of thyroid diseases related to iodine deficiency among the offspring of Mayak Production Association personnel was almost twice higher than the in the control group: 1.92 (1.3–2.84) among boys, 1.68 (1.29–2.2) among girls, 1.7 (1.36–2.12) in the whole group. Discussion and conclusion: A statistically significant overweight of non-tumor thyroid pathology in the offspring of Mayak Production Association personnel cannot be explained through external reasons taking into account similar climate and geographic conditions, possible technogenic exposure and the same unified medical survey of the followed children. We cannot exclude increased sensibility of thyroid tissue to iodine deficiency and its predisposition to hypertrophy and hyperplasia among the offspring of individuals exposed to long term occupational contact with ionizing radiation sources; that should be taken into account in the course of medical monitoring of these patients. Further research of transgenerational effects in the offspring of personnel of radiation hazardous production facilities are needed for complete understanding of the role of parental occupational exposure in health risks for further generations.

Key words: Endocrine metabolic diseases, thyroid disorders, iodine deficiency, thyroid cancer, preconceptional radiation exposure, offspring, external gamma-exposure, gonadal dose, Mayak Production Association.

Последствия прекоцептивного облучения родителей: эндокринно–обменная патология у потомков

С.Ф. Соснина, П.В. Окатенко, М.Э. Сокольников

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

Эпидемиологические исследования отдаленных эффектов прекоцептивного (до зачатия) радиационного воздействия необходимы для понимания рисков опухолевой и неопухолевой патологии у последующих поколений. Изучение возможной связи прекоцептивного облучения родителей

Svetlana F. Sosnina

Southern Urals Biophysics Institute

Address for correspondence: Ozyorskoe shosse, 19, Ozyorsk, Chelyabinsk Region, 456783, Russia; E-mail: sosnina@subi.su

Соснина Светлана Фаридовна

Южно-Уральский институт биофизики

Адрес для переписки: 456783, Россия, Челябинская область, Озёрск, Озёрское шоссе, 19; E-mail: sosnina@subi.su

с формированием эндокринно-обменных нарушений у потомков является одним из актуальных аспектов радиационной гигиены. Цель работы: сравнительный анализ эндокринно-обменной патологии среди детей, чьи родители подверглись пролонгированному прекоцептивному внешнему гамма-облучению на производственном объединении «Маяк» — первом в стране предприятии атомной отрасли. Материалы и методы: ретроспективное исследование выполнено на основе Регистра здоровья детского населения г. Озерска, градообразующим предприятием которого является производственное объединение «Маяк». Анализ эндокринно-обменных расстройств проведен среди 13 880 детей 1949–1973 гг.р., родившихся и проживавших в г. Озерск, из которых у 9321 ребенка родители до зачатия подверглись пролонгированному внешнему гамма-облучению на производстве. Проведен сравнительный анализ структуры и частоты класса «Болезни эндокринной системы, расстройства питания и нарушения обмена веществ» и его нозологических форм. Проанализированы особенности прекоцептивного облучения родителей при детской тиреоидной патологии. Рассчитан относительный риск эндокринно-обменных нарушений среди детей экспонированных и неэкспонированных родителей в целом по классу и по нозологиям. Результаты исследования: среди потомков работников производственного объединения «Маяк» отмечено значимое преобладание болезней щитовидной железы и, в частности, йододефицитных состояний, которые диагностировались в более раннем возрасте, чем в контроле, и в большинстве случаев относились к прекоцептивному облучению родителей в области малых доз. Рак щитовидной железы зарегистрирован в последующем у 0,16% (15/9321) исследуемой когорты потомков облученных родителей со средним возрастом манифестации 42,6 года. Относительный риск болезней щитовидной железы был значимо выше среди потомков экспонированных родителей по сравнению с контролем: среди мальчиков — 2,0 (95% доверительный интервал 1,38–2,9), среди девочек — 1,59 (1,25–2,02), в целом по группе — 1,64 (1,34–2,01). Относительный риск болезней щитовидной железы, связанных с йодной недостаточностью, среди потомков персонала производственного объединения «Маяк» почти вдвое превышал показатели в контроле: ОР 1,92 (ДИ 1,3–2,84) среди мальчиков, 1,68 (1,29–2,2) среди девочек, 1,7 (1,36–2,12) в целом по группе. Обсуждение и заключение: статистически значимое преобладание неопухолевой патологии щитовидной железы у потомков персонала производственного объединения «Маяк» нельзя объяснить внешними причинами, учитывая одинаковые климато-географические условия, возможное техногенное радиационное воздействие и единое медицинское обеспечение наблюдаемых детей. Повышенная восприимчивость тиреоидной ткани к дефициту йода и её предрасположенность к гипертрофии и гиперплазии среди потомков, чьи родители подверглись длительному профессиональному контакту с источниками ионизирующих излучений, не исключается, что важно учитывать при проведении медицинского мониторинга этих лиц. Дальнейшие исследования трансгенерационных эффектов у потомков персонала радиационно-опасных производств необходимы для полного понимания роли производственного облучения в риске для здоровья последующих поколений.

Ключевые слова: эндокринно-обменные расстройства, тиреоидная патология, йододефицит, рак щитовидной железы, облучение до зачатия, потомки, внешнее гамма-облучение, доза на гонады, производственное объединение «Маяк».

Introduction

The effects of parental preconceptional (prior to conception) exposure to the offspring health remain one of the disputable issues of radiation hygiene. While the effects of radiation exposure in the offspring of exposed individuals are beyond all doubt in numerous experimental studies [1–3], the results of epidemiological assessments are rather contradictory [4, 5].

Specific character of the response of various organs and systems to preconceptional exposure is complicated for research, since their damage can be associated not only with radiation exposure, but also with a lot of non-radiation factors. At the same time, analysis of the possible role of parental preconceptional exposure as a potential factor of cancer development and of a number of non-tumor multifactorial diseases in children is necessary to develop preventive measures for personnel at radiation hazardous production facilities and for their offspring.

The endocrine system is one of the most sensitive systems to external effects. Predisposition to diseases of the endocrine apparatus among the offspring of the individuals exposed to acute or chronic contact with ionizing radiation sources is a topical issue of epidemiological research [6, 7].

Введение

Последствия прекоцептивного (до зачатия) облучения родителей для здоровья потомков остаются одним из спорных вопросов радиационной гигиены. Если в многочисленных экспериментальных исследованиях эффекты радиационного воздействия у потомства облученных особей не вызывают сомнений [1–3], то результаты эпидемиологических оценок достаточно противоречивы [4, 5].

Специфика реагирования различных органов и систем в ответ на прекоцептивное облучение сложна для изучения, поскольку их повреждение может быть связано не только с радиационным воздействием, но и с множеством факторов нерадиационной природы. Вместе с тем, анализ возможной роли прекоцептивного облучения родителей как потенциального фактора канцерогенеза и целого ряда неопухолевых мультифакторных заболеваний у детей необходим для разработки профилактических мер в отношении персонала радиационно-опасных производств и их потомков.

Эндокринная система относится к числу наиболее восприимчивых к внешнему воздействию систем организма. Предрасположенность к болезням эндокринного

However, there are few publications describing the long term effects of parental preconceptional exposure.

In addition to the short period of follow up, the small number of study groups [8, 9] is another problem of the epidemiological analysis of this issue. A cohort of the offspring of the workers of Mayak Production Association (PA) – the country’s first atomic production enterprise, which has been operating since 1948, can be used as a valuable information resource for assessing the effects of occupational parental exposure. The long period of follow up of the first generation of offspring of Mayak PA personnel and the possibility of combination of representative study groups make it possible to perform an analysis with sufficient statistical power.

The objective of the study: assessment of the risk of endocrine and metabolic pathology among children whose parents were exposed to prolonged preconceptional external gamma-irradiation at Mayak PA.

Materials and methods

Ozyorsk Children’s Health Registry of the Closed Administrative Territorial Unit (CATU) Ozyorsk where Mayak PA as the city-forming enterprise was the source of information for the retrospective epidemiological analysis. The register was developed and maintained in the Laboratory of Radiation Epidemiology in the Southern Urals Biophysics Institute and contains medical and social information from archival medical records of the child population of the CATU [10]. Information on individual doses of occupational parental exposure was obtained from the “Mayak Workers Dosimetry System – 2013” [11]. The characteristics of the accumulated absorbed doses of external gamma radiation to the gonads and the Hp equivalent doses (10) of photon radiation are presented.

This research work comprises a 25-year period of childbirth in the CATU (1949-1973 years of birth) including the first generation offspring of Mayak PA workers. Initial data for the analysis taken from the Registry are presented in Table 1.

аппарата среди потомков лиц, подвергшихся острому или хроническому контакту с источниками ионизирующих излучений, является актуальной темой эпидемиологических исследований [6, 7]. Однако публикации, описывающие долгосрочные последствия прекоцептивного облучения родителей, немногочисленны.

Помимо кратковременности наблюдения, другой проблемой эпидемиологического анализа данного вопроса является малочисленность групп исследуемых [8, 9]. Когорта потомков работников производственного объединения (ПО) «Маяк» – первого в стране предприятия атомной отрасли, функционирующего с 1948 г., может служить ценным информационным ресурсом для оценки эффектов профессионального облучения. Длительный срок наблюдения за первым поколением потомков персонала ПО «Маяк» и возможность формирования репрезентативных групп для исследований позволяют проводить анализ достаточной статистической мощности.

Цель исследования – оценка риска эндокринно-обменной патологии среди детей, чьи родители подверглись пролонгированному прекоцептивному внешнему гамма-облучению на ПО «Маяк».

Материалы и методы

Источником информации для ретроспективного эпидемиологического анализа послужил Регистр здоровья детского населения закрытого административно-территориального образования (ЗATO) г. Озерск, градообразующим предприятием которого является ПО «Маяк». Регистр создан и поддерживается в лаборатории радиационной эпидемиологии ЮУрИБФ и содержит медико-социальную информацию из архивных амбулаторных карт детского населения ЗATO [10].

Информация об индивидуальных дозах профессионального облучения родителей получена из «Дозиметрической Системы Работников Маяка – 2013»

Characteristics of the Ozyorsk Children’s Health Registry (1949–1973 years of birth)

Table 1

Характеристика Регистра здоровья детского населения г. Озерска (1949–1973 гг.р.)

[Таблица 1

Years of birth [Годы рождения детей]	Number of individuals in the Ozyorsk Children’s Health Registry [Число лиц в Регистре здоровья детского населения ЗATO]										
	Male [Муж.]	Female [Жен.]	Total [Всего]	Of them Mayak PA workers’ offspring [Из них потомки персонала ПО «Маяк»]		including measured accumulated doses of preconceptional occupational exposure: [в том числе измеренные накопленные дозы профессионального облучения до зачатия]					
						father only [только у отца]		mother only [только у матери]		both parents [у обоих родителей]	
Abs. [Абс.]	%	Abs. [Абс.]	%*	Abs. [Абс.]	%*	Abs. [Абс.]	%*	Abs. [Абс.]	%*		
1949–1953	594	711	1305	539	41.3	193	35.8	97	18.0	58	10.8
1954–1958	1903	1880	3783	1619	42.8	753	46.5	257	15.9	391	24.2
1959–1963	3386	3151	6537	2877	44.0	1996	69.4	201	7.0	330	11.5
1964–1968	2596	2437	5033	2285	45.4	1691	74.0	103	4.5	157	6.9
1969–1973	2854	2771	5625	2001	35.6	1426	71.3	83	4.1	97	4.8
1949–1973	11333	10950	22283	9321	41.8	6059	65.0	741	7.9	1033	11.1

* – percentage calculated against the total number of Mayak PA workers’ offspring.

[* – процент рассчитан от числа потомков работников ПО «Маяк»].

The study groups were formed as follows:

- the main group: medical data on the first generation offspring of Mayak Production Association workers employed in 1948–1982 and exposed to preconceptional occupational radiation was taken from the Ozyorsk Children's Health Registry; the offspring were born in the CATU in 1949–1973 and resided in the city. The study sampling of children made a total of 9321 individuals: 51.2% (4776) boys, 48.8% (4545) girls;

- the control group: medical data on the children of unexposed individuals (the parents were not exposed to occupational radiation prior to conception, were not relocated from radioactively contaminated areas, never took part in liquidation of the consequences of radiation accidents) was taken from the Ozyorsk Children's Health Registry; the offspring were born in the CATU in 1949–1973 and resided in the city. The comparison group contained 4559 individuals: 43.8% (1996) boys, 56.2% (2563) girls.

The formed groups are comparable by years of birth, gender, by the fact of birth in the CATU. Children born outside the city and migrated into it in childhood were excluded from the study in order to provide the same climate and geographical conditions and possible technogenic background of residence as well as the same level and quality of medical survey for both groups.

Class IV "Endocrine, nutritional and metabolic diseases" (codes E00-E90) of the International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems of the tenth revision was analyzed. Cases of newly registered diagnoses in children under 15 years were taken into account.

Information on the cases of malignant neoplasms of the thyroid gland among the children and adults of the CATU was obtained from the "Cancer Register of the CATU Ozyorsk population" [12]. The cases of thyroid cancer were traced to 31.12.2020; the total number of person-years of observation was 406456 person-years.

Statistical data analysis was performed using the STATISTICA software package Version 10 (StatSoft, USA). The normality of distribution was assessed using the Kolmogorov-Smirnov test. Descriptive statistics for normally distributed characteristics are presented as mean values (M) \pm standard square deviation (s); in case of a distribution different from normal, as a median (Me) and an interquartile range (25th and 75th percentiles).

The level of statistical significance of the differences between the compared groups was defined using the χ^2 test and Fisher's exact test. The differences were considered statistically significant at $p < 0.05$. Calculation of relative risk (RR) among the offspring of exposed and unexposed parents was performed with 95% confidence interval (CI).

Results and discussion

Analysis of the accumulated preconceptional doses of occupational exposure of the parents – Mayak PA workers, had demonstrated an intense spread of values due to diversity of occupational exposure scenarios (Table 2).

In the first years of operation of the enterprise, Mayak PA workers could be exposed to significant radiation doses due to extremely short deadlines for obtaining artificial sources of ionizing radiation for industrial and weapon purposes, due to lack of experience and imperfection of the technology, as well as due to official occupational exposure dose limits that existed at that time.

[11]. Представлены характеристики накопленных поглощенных доз внешнего гамма-облучения на гонады и эквивалентов доз $H_p(10)$ фотонного излучения.

Данное исследование охватывает 25-летний период рождения детей в ЗАТО (1949–1973 гг. рождения), в том числе первого поколения потомков работников ПО «Маяк». Исходные данные для анализа, извлеченные из Регистра, представлены в таблице 1.

Формирование исследуемых групп проведено следующим образом:

- основная группа: из Регистра здоровья детского населения ЗАТО г. Озерск извлечены медицинские сведения о первом поколении потомков работников ПО «Маяк» 1948–1982 гг. найма, подвергшихся прекоцептивно-му производственному облучению; потомки родились в ЗАТО в 1949–1973 гг. и проживали в городе. Изучаемая выборка детей в итоге составила 9321: 51,2% (4776) мальчиков, 48,8% (4545) девочек;

- группа сравнения: из Регистра здоровья детского населения ЗАТО г. Озерск извлечены медицинские сведения о детях необлученных лиц (родители до зачатия ребенка не подвергались профессиональному облучению, не являлись переселенцами с радиоактивно загрязненных территорий, не участвовали в ликвидации последствий радиационных аварий), дети родились в ЗАТО в 1949–1973 гг. и проживали в городе. Группа сравнения включала 4559 человек: 43,8% (1996) мальчиков, 56,2% (2563) девочек.

Сформированные группы сопоставимы по годам рождения, полу, факту рождения в ЗАТО. Родившиеся вне города и приехавшие в него в детском возрасте исключены из исследования, чтобы наблюдаемые группы характеризовались одинаковыми климато-географическими условиями и возможным техногенно измененным фоном проживания, а также единым уровнем и качеством медицинского обслуживания.

Проанализирован класс IV «Болезни эндокринной системы, расстройства питания и нарушения обмена веществ» (коды E00–E90) Международной статистической классификации болезней и проблем, связанных со здоровьем, 10-го пересмотра. Учены случаи впервые зарегистрированных диагнозов у детей до 15-летнего возраста.

Информация о случаях злокачественных новообразований (ЗНО) щитовидной железы (ЩЖ) среди детского и взрослого населения ЗАТО получена из «Канцер-регистра населения ЗАТО г. Озёрск» [12]. Случаи ЗНО ЩЖ прослежены до 31.12.2020 г., суммарное число человеко-лет наблюдения составило 406 456 чел.-лет.

Статистический анализ данных проведен с помощью пакета программ STATISTICA Version 10 (StatSoft, USA). Нормальность распределения оценивалась с помощью критерия Колмогорова – Смирнова. Описательная статистика для нормально распределенных признаков представлена в виде средних значений (M) \pm среднее квадратическое отклонение (s); при распределении, отличающемся от нормального, – в виде медианы (Me) и интерквартильного размаха (25-й и 75-й процентиля).

Определение уровня статистической значимости различий между сравниваемыми группами проведено при помощи критерия χ^2 и точного критерия Фишера. Различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$. Расчет

Characteristics of cumulative preconceptional doses of external gamma-radiation at production facility

Table 2

Характеристика суммарных прекоцептивных доз внешнего гамма-облучения на производстве

[Таблица 2]

Preconceptional doses [Прекоцептивные дозы]	Dose range [Диапазон доз]	M±s	Me [Q25;Q75]
<i>Maternal exposure prior to conception</i> [Прекоцептивное облучение матерей]			
Doses to ovaries, Gy [Дозы на яичники, Гр]	0.01–4.08	0.39±0.53	0.17 [0.04;0.54]
Doses Hp (10), Sv [Дозы Hp (10), Зв]	0.01–6.69	0.57±0.79	0.24 [0.05;0.78]
<i>Paternal exposure prior to conception</i> [Прекоцептивное облучение отцов]			
Doses to testicles, Gy [Дозы на семенники, Гр]	0.01–5.65	0.42±0.64	0.17 [0.05;0.51]
Doses Hp (10), Sv [Дозы Hp (10), Зв]	0.01–6.92	0.49±0.72	0.19 [0.05;0.6]

M – mean value, s – mean square deviation; Me – median of the sampling, [Q25; Q75] – interquartile range.
[M – среднее значение, s – среднее квадратическое отклонение; Me – медиана выборки, [Q25; Q75] – интерквартильный размах]

In general, the range of parental total preconceptional doses of occupational external gamma-radiation exceeded the dosimetry data on maternal exposure reaching 5.65 Gy to the testicles. At the same time, the medians of parental preconceptional doses both to gonads and individuals dose equivalents Hp (10) of photon radiation differed insignificantly.

относительного риска (ОР) среди потомков экспонированных и неэкспонированных родителей проводился с 95% доверительным интервалом (ДИ).

The class "Endocrine, nutritional and metabolic diseases" (Table 3) took the 6th ranking place in the structure of all non-tumor pathology in children aged under 15, and made 4.5% in the main group and 5.0% in controls, p>0.05.

Результаты и обсуждение

Анализ накопленных прекоцептивных доз профессионального облучения родителей-работников ПО «Маяк» показал выраженный разброс значений, обусловленный многоплановостью сценариев производственного облучения (табл. 2).

Structure of endocrine and metabolic diseases in the compared groups

Table 3

Структура эндокринно-обменных заболеваний в сравниваемых группах

[Таблица 3]

Endocrine and metabolic pathology (ICD-10 codes) [Эндокринно-обменная патология (коды по МКБ-10)]	The main group [Основная группа]						The control group [Группа сравнения]					
	Boys [Мальчики (n=4776)]		Girls [Девочки (n=4545)]		Both genders [Оба пола (n=9321)]		Boys [Мальчики (n=1996)]		Girls [Девочки] (n=2563)		Both genders [Оба пола (n=4559)]	
	Abs. [Абс.]	%	Abs. [Абс.]	%	Abs. [Абс.]	%	Abs. [Абс.]	%	Abs. [Абс.]	%	Abs. [Абс.]	%
Disorders of thyroid gland [Болезни щитовидной железы] (E00–E07)	158*	6.6	242*	10.02	400*	8.3	33	3.27	86	6.1	119	4.9
Diabetes mellitus [Сахарный диабет] (E10–E14)	3	0.13	1	0.04	4	0.1	2	0.2	3	0.2	5	0.2
Other disorders of glucose regulation and pancreatic internal secretion [Другие нарушения регуляции глюкозы] (E15–E16)	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	1	0.07	1	0.0
Disorders of other endocrine glands [Нарушения других эндокринных желез] (E20–E35)	49	2.04	31	1.28	80	1.7	18	1.78	18	1.28	36	1.5
Malnutrition [Недостаточность питания] (E40–E46)	456	19.0	595	24.64	1051*	21.8	206	20.4	370	26.2	576	23.8

Endocrine and metabolic pathology (ICD-10 codes) [Эндокринно-обменная патология (коды по МКБ-10)]	The main group [Основная группа]						The control group [Группа сравнения]					
	Boys [Мальчики] (n=4776)		Girls [Девочки] (n=4545)		Both genders [Оба пола] (n=9321)		Boys [Мальчики] (n=1996)		Girls [Девочки] (n=2563)		Both genders [Оба пола] (n=4559)	
	Abs. [Абс.]	%	Abs. [Абс.]	%	Abs. [Абс.]	%	Abs. [Абс.]	%	Abs. [Абс.]	%	Abs. [Абс.]	%
Other nutritional deficiencies [Другие виды недостаточности питания] (E50–E64)	1600	66.7	1395*	57.77	2995*	62.2	706	69.9	861	61.0	1567	64.7
Obesity and other hyperalimentation [Ожирение и другие виды избыточности питания] (E65–E68)	123	5.13	143	5.92	266	5.5	45	4.45	68	4.8	113	4.7
Metabolic disorders [Нарушения обмена веществ] (E70–E90)	9	0.4	8	0.33	17	0.4	0	0.0	5	0.35	5	0.2
TOTAL [ВСЕГО]	2398	100	2415	100	4813	100	1010	100	1412	100	2422	100

*- statistically significant differences with the control group.

[*- статистически значимые различия с группой сравнения].

A proper comparison with national statistics values by specific weight of endocrine pathology in the whole structure of child incidence is impossible as far as we have no available statistical data for the followed period. According to later data, endocrine diseases, nutritional and metabolic disorders made 1.7% and 3.7%, correspondingly, in the structure of the overall child and teenage incidence in the Russian Federation (2009) [13].

The subclass "Malnutrition" (codes E40-46, E50-64) mainly represented by mild protein-calorie deficiency and manifestations of vitamin deficiency including rickets consequences, took the lead among endocrine and metabolic diseases in both groups. A comparative analysis indicated a statistically significant excess of nutritional deficiency cases in the control group among girls ($p=0.012$) and in the whole group ($p<0.01$). A detailed analysis of this pathology revealed more frequent manifestations of rickets and post-infectious hypotrophy among non-exposed parents' children. The fact of better social maintenance of city-forming enterprise workers [14] deserves attention which could possibly explain a smaller number of malnutritions among Mayak PA workers' offspring.

The subclass "Disorders of thyroid gland" took the second ranking place, making 8.3% (400/4813) of the whole endocrine pathology in the main group and 4.9% (119/2422) in the control group, $p<0.001$. Significant statistical differences in the groups were found not only by the total of follow-up but also in analyzing thyroid disorders depending on sex. Significant excess of thyroid pathology incidence was registered in comparison to controls both among boys ($p=0.0002$) and girls ($p=0.0001$) whose parents were Mayak PA workers.

Comparison of other subclasses of endocrine and metabolic diseases did not reveal any statistically significant differences between the groups. Thus, glucose metabolism disorders were in individual cases and were mostly represented by insulin dependent diabetes that belongs to socially significant diseases, it is one of the most serious

В первые годы эксплуатации предприятия работники ПО «Маяк» могли подвергаться значительному радиационному воздействию в связи с крайне сжатыми сроками для получения искусственных источников ионизирующего излучения промышленного и оружейного назначения, отсутствием опыта и несовершенством технологии, а также существовавшими на тот момент официальными пределами доз профессионального облучения.

В целом, диапазон суммарных прекоцептивных доз производственного внешнего гамма-облучения отцов превышал дозиметрические данные по материнскому облучению, достигая 5,65 Гр на область семенников. В то же время медианы доз прекоцептивного облучения родителей, как на область гонад, так и индивидуальных эквивалентов доз Нр (10) фотонного излучения, различались несущественно.

Класс «Болезни эндокринной системы, расстройства питания и нарушения обмена веществ» (табл. 3) занимал в структуре всей неопухолевой патологии у детей до 15-летнего возраста 6-е ранговое место и составлял 4,5% в основной группе и 5,0% в контроле, $p>0,05$.

Корректное сравнение с показателями национальной статистики по удельному весу эндокринной патологии в структуре всей неопухолевой детской заболеваемости невозможно, так как мы не располагаем статистическими данными для наблюдаемого периода. Согласно более поздним сведениям, болезни эндокринной системы, расстройства питания и нарушения обмена веществ составляли в структуре общей заболеваемости детей и подростков в Российской Федерации 1,7 и 3,7% соответственно (2009 г.) [13].

Ведущие позиции среди эндокринно-обменных заболеваний в обеих группах занимал подкласс «Недостаточность питания» (коды E40–46, E50–64), большей частью представленный белково-энергетической недостаточностью легкой степени и проявлениями витаминного дефицита, включая последствия рахита. Сравнительный анализ показал статистически значимое

sociomedical problems and the most common cause of disability among non-tumor diseases of the endocrine system [15, 16]. The structure of the subclass "Disorders of other endocrine glands" (codes E20-E35) was mostly represented by thymus diseases including thymomegalia as a leading nosology. It should be noted that thymus enlargement was often defined as an incidental finding during a chest X-ray and was not accompanied by any specific clinical symptoms. The age at diagnostics of this state related mainly to the period of infancy and early childhood, and further a natural thymic involution was registered.

Among the other states in the subclass "Other endocrine glands' disorders", rare cases of impaired puberty and Cushing syndrome caused by a long-term exogenous intake of corticosteroids, were registered in both groups. The subclass "Obesity and other hyperalimentation" was registered in both groups with the same frequency, on the average 4.7-5.5% of the whole child's endocrine pathology ($p > 0.05$); compliance with dietary structure, physical activity and parents' style of living as their children health determinants [17] played a rather important role in the development of this type of disorder.

Taking into account statistically significant thyroid pathology differences between the groups, thyroid diseases were considered in more detail (table 4).

In the structure of thyroid pathology, "Iodine-deficiency-related thyroid disorders and allied conditions" (code E01) which significantly predominated over a specific weight

превышение числа случаев недостаточности питания в группе сравнения среди девочек ($p=0,012$) и в целом по группе ($p < 0,01$). Детальный анализ этой патологии обозначил более частые проявления рахита и постинфекционной гипотрофии среди детей необлученных родителей. Заслуживает внимания в связи с этим факт лучшего социального обеспечения работников градообразующего предприятия [14], что, возможно, объясняет меньшее число расстройств питания среди потомков персонала ПО «Маяк».

Второе ранговое место занимал подкласс «Болезни щитовидной железы», составляя 8,3% (400/4813) всей эндокринной патологии в основной группе и 4,9% (119/2422) в группе сравнения, $p < 0,001$. Значимые статистические различия в группах были найдены не только по сумме наблюдений, но и при анализе заболеваний ЩЖ в зависимости от пола. Существенное превышение частоты тиреоидной патологии по сравнению с контролем отмечено как среди мальчиков ($p=0,0002$), так и среди девочек ($p=0,0001$), чьи родители были работниками ПО «Маяк».

Сравнение других подклассов эндокринно-обменных болезней не выявило статистически значимых различий между группами. Так, нарушения метаболизма глюкозы встречались в единичных случаях и большей частью были представлены инсулинзависимым сахарным диабетом, который относится к социально-значимым заболевани-

Table 4

Structure of thyroid diseases in the compared groups

[Таблица 4

Структура болезней щитовидной железы в сравниваемых группах]

Endocrine and metabolic pathology (ICD-10 codes) [Эндокринно-обменная патология (коды по МКБ-10)]	The main group [Основная группа]						The control group [Группа сравнения]					
	Boys [Мальчики] (n=4776)		Girls [Девочки] (n=4545)		Both genders [Оба пола] (n=9321)		Boys [Мальчики] (n=1996)		Girls [Девочки] (n=2563)		Both genders [Оба пола] (n=4559)	
	Abs. [Абс.]	% (for 10 ³) [на 10 ³]	Abs. [Абс.]	% (for 10 ³) [на 10 ³]	Abs. [Абс.]	% (for 10 ³) [на 10 ³]	Abs. [Абс.]	% (for 10 ³) [на 10 ³]	Abs. [Абс.]	% (for 10 ³) [на 10 ³]	Abs. [Абс.]	% (for 10 ³) [на 10 ³]
Iodine-deficiency-related thyroid disorders and allied conditions [Болезни щитовидной железы, связанные с йодной недостаточностью, и сходные состояния] (E01)	138*	87.3 (28.9)	206*	85.1 (45.3)	344*	86.0 (36.9)	30	90.9 (15.0)	69	80.2 (26.9)	99	83.2 (21.7)
Hypothyroidism, unspecified [Гипотиреоз неуточненный] (E03.9)	0	0.0	1	0.4 (0.2)	1	0.25 (0.1)	0	0.0	1	1.2 (0.4)	1	0.8 (0.2)
Other nontoxic goitre [Другие формы нетоксического зоба] (E04)	2	1.3 (0.4)	5	2.1 (1.1)	7	1.75 (0.8)	0	0.0	4	4.65 (1.6)	4	3.4 (0.9)
Thyrotoxicosis (hyperthyroidism) [Тиреотоксикоз (гипертиреоз)] (E05)	0	0.0	6	2.5 (1.3)	6	1.5 (0.6)	0	0.0	4	4.65 (1.6)	4	3.4 (0.9)

Endocrine and metabolic pathology (ICD-10 codes) [Эндокринно-обменная патология (коды по МКБ-10)]	The main group [Основная группа]						The control group [Группа сравнения]					
	Boys [Мальчики] (n=4776)		Girls [Девочки] (n=4545)		Both genders [Оба пола] (n=9321)		Boys [Мальчики] (n=1996)		Girls [Девочки] (n=2563)		Both genders [Оба пола] (n=4559)	
	Abs. [Абс.]	% (for 10 ³) [на 10 ³]	Abs. [Абс.]	% (for 10 ³) [на 10 ³]	Abs. [Абс.]	% (for 10 ³) [на 10 ³]	Abs. [Абс.]	% (for 10 ³) [на 10 ³]	Abs. [Абс.]	% (for 10 ³) [на 10 ³]	Abs. [Абс.]	% (for 10 ³) [на 10 ³]
Autoimmune thyroiditis [Аутоиммунный тиреоидит] (E06.3)	0	0.0	1	0.4 (0.2)	1	0.25 (0.1)	0	0.0	0	0.0	0	0.0
Other disorders of thyroid [Другие болезни щитовидной железы] (E07)	18	11.4 (3.8)	23	9.5 (5.1)	41	10.25 (4.4)	3	9.1 (1.5)	8	9.3 (3.1)	11	9.2 (2.4)
TOTAL [ВСЕГО]	158*	100	242*	100	400*	100	33	100	86	100	119	100

*- statistically significant differences with the comparison group.
 [*- статистически значимые различия с группой сравнения].

of other thyroid nosologies in children, were registered in both groups most often. High incidence of iodine deficiency states is due to the fact iodine deficiency was found on 70% of the territory of the Russian Federation in environmental compartments [18, 19], and the Ural region which belongs to the endemic area of iodine deficiency, is no exception. Moreover, anatomical and physiological characteristics of a young organism predispose to increased sensitivity to the impact of environmental factors [20] that explains high level of this thyroid pathology among children.

The observed groups are comparable for birth and residence in the CATU Ozyorsk, so the difference between them in natural iodine content in the environment is unlikely. However, the comparative assessment of iodine deficiency states revealed their marked statistically significant excess among exposed parents' offspring compared to the controls. These differences were reliable both when comparing the groups in the whole and when analyzing by sex ($p < 0.001$).

No significant difference in the periods of iodine deficiency manifestation was registered: the peak of this pathology diagnostics was in the period of 1970-1979 that may have been related to greater attention of the public health service in CATU to the problem of metabolic disorders due to iodine deficiency and diagnostic and development of prevention techniques for given states during these years. At the same time, end of iodine preventive measures in the country starting from the late 1970-ies with increasing levels of chemical pollution on many territories resulted in stable iodine deficiency and in "appearance of specific features of goitrous endemia – high prevalence of goiter not only among school children but among younger children, and bridging the sex gap" [18].

Mean age at iodine diagnosis in the studied groups was in the pre-puberty period. Meanwhile, earlier development of the disease was registered among exposed parents' children (mean age is 8.1 years, in the comparison group – 11.6 years).

Iodine deficiency disorders in both groups were significantly more often registered among girls – 59.9% (206/344) of cases in the main group and 69.7% (69/99) in the control group. In the range of iodine deficiency states among

ям, является одной из наиболее острых медико-социальных проблем и самой частой причиной инвалидности среди неопухолевых заболеваний эндокринной системы [15, 16].

Структура подкласса «Нарушения других эндокринных желез» (коды E20–E35), в основном, была представлена болезнями вилочковой железы, в том числе тимомегалией в качестве ведущей нозологии. Следует отметить, что увеличение вилочковой железы часто определялось как случайная находка при проведении рентгенограммы грудной клетки и не сопровождалось специфической клинической симптоматикой. Возраст диагностики этого состояния, главным образом, относился к периоду грудного и раннего возраста детей, в последующем отмечалась закономерная инволюция тимуса.

Из других состояний подкласса «Нарушения других эндокринных желез» в обеих группах регистрировались единичные случаи нарушения полового созревания и синдрома Иценко – Кушинга, вызванного длительным экзогенным поступлением глюкокортикоидных препаратов. Подкласс «Ожирение и другие виды избыточности питания», немаловажную роль в развитии которого играют соблюдение адекватного рациона питания, физическая активность и образ жизни родителей в целом как детерминанта здоровья детей [17], встречался в обеих группах с одинаковой частотой, составляя в среднем 4,7–5,5% всей детской эндокринной патологии ($p > 0,05$).

Учитывая статистически значимые различия в группах по тиреоидной патологии, болезни ЩЖ были рассмотрены подробнее (табл. 4).

В структуре патологии ЩЖ наиболее часто в обеих группах регистрировались «Болезни щитовидной железы, связанные с йодной недостаточностью, и сходные состояния» (код E01), существенно преобладавшие над удельным весом других тиреоидных нозологий у детей. Высокая распространённость йоддефицитных состояний обусловлена тем, что на 70% территории Российской Федерации выявлен дефицит йода в объектах окружающей среды [18, 19], и Уральский регион не является ис-

children under the age of 15, a nontoxic goiter characterized by thyroid diffuse or nodular enlargement with its function saved was the most frequent manifestation.

A statically significant increase of thyroid volume depending on radioactive ^{131}I dose was revealed based on the screening results of the Belorussian-American cohort study of Belarus residents aged up to eighteen years exposed to the accidental release following the accident at Chernobyl NPP [21]. At the same time, as compared to the Gomel and Nagasaki areas, iodine deficiency screening in school children on the territory close to Semipalatinsk Nuclear Test Site did not reveal any symptoms of severe iodine deficiency and transgenerational risk for children whose parents were exposed as a result of the tests [22].

Probability of technogenic intake of radioactive iodine as a result of the Mayak PA operation for the CATU child population remains possible. It is known that ^{131}I is one of "the most radiation-hazardous radionuclides that is a part of routine (and/or accidental) releases of nuclear reactors and spent nuclear fuel reprocessing plants" [23]. According to the data from Glagolenko Y.V. et al. [24], in the period of 1948-1967 when there were no standard systems for continuous emission monitoring, "in total, atmospheric emissions from the radiochemical plants released from 0.72 mIn Curie (the lowest estimates) to 1.3 mIn Curie (the highest estimates) with the most probable value of 1.0 mIn Curie of ^{131}I ". The residents of the territories contaminated due to radioactive fallout are exposed to internal radiation not only as a result of inhalation intake during the period of radiation cloud passage but also as a result of consumption of contaminated food and water [25].

At the same time, it seems to be impossible to associate supposed chronic exposure to radioactive iodine with iodine deficiency diseases in the studied children since before 1967 only isolated cases of this thyroid pathology were registered in our study. 2.6% (9/344) of the cases in the main group diagnosed in 1956-1967, and 4% (4/99) of the cases in the control group diagnosed in 1961-1967 ($p > 0.05$) belonged to this period. The main part of iodine deficiency states was registered after normalization of the radiation situation in CATU. According to published data, the method of continuous monitoring of the radioactive emissions was introduced in the Mayak PA plants after 1970, with the use of special filters, the exposure time of which was 3-5 days [24].

The fact of excess number of iodine deficiency states and thyroid pathologies in whole among Mayak PA workers' offspring deserves close attention. Along with the absence of any difference in climatic and geographic conditions, identical iodine intake from the environment, common approaches to diagnostics and prevention of iodine deficiency states in CATU, thyroid pathology was registered more often and at earlier age among exposed parents' offspring in comparison to intact individuals' children.

Healthcare of CATU child population was organized based on the uniform nationwide standards and was the same for Mayak PA workers' children and non-exposed parents' offspring. As opposed to the plant health service with special status and routine observation of Mayak PA workers, members of their families had not got any benefits. Consequently, more frequent registration of thyroid pathology due to better periodic health examination of Mayak PA workers' offspring is excluded.

It is also important to consider that the studied groups consisted of the children born and resided in CATU which

ключением, относясь к эндемичному району по недостатку йода. Кроме того, анатомические и физиологические особенности молодого организма предрасполагают к повышенной чувствительности к воздействию факторов внешней среды [20], что объясняет высокий уровень данной тиреоидной патологии среди детей.

Наблюдаемые группы сопоставимы по факту рождения и проживания в ЗАТО г. Озерск, поэтому разница между ними в естественном содержании йода в окружающей среде маловероятна. Однако сравнительная оценка йоддефицитных тиреоидных состояний показала их существенное статистически значимое превышение среди потомков облученных родителей над контролем. Эти различия были достоверными как при сравнении групп в целом, так и при анализе в зависимости от пола ($p < 0,001$).

Весомой разницы в периодах манифестации йоддефицита в группах не обнаружено: пик диагностики этой патологии приходился на период 1970–1979 гг., что, возможно, было связано с повышенным вниманием здравоохранения в ЗАТО к проблеме обменных нарушений вследствие йоддефицита и развитию методов диагностики и профилактики данных состояний в эти годы. В то же время прекращение с конца 1970-х гг. йодной профилактики в стране при нарастании уровней химического загрязнения на многих территориях привело к сохранению йодного дефицита и «появлению специфических черт зубной эндемии – высокой распространённости зоба не только у школьников, но и у детей раннего возраста, и сглаживанию половых различий» [18].

Средний возраст установления диагноза йоддефицита в исследуемых группах приходился на допубертатный период. Между тем среди детей облученных родителей отмечено более раннее начало заболевания (средний возраст – 8,1 года, в группе сравнения – 11,6 лет).

Йоддефицитные состояния в обеих группах значимо чаще регистрировались среди девочек – 59,9% (206/344) случаев в основной группе и 69,7% (69/99) в контроле. В спектре йоддефицитных состояний среди детей до 15 лет наиболее частым проявлением был нетоксический зоб, характеризующийся диффузным или узловым увеличением ЩЖ с сохранением её функции.

Статистически значимое увеличение объёма ЩЖ в зависимости от дозы радиоактивного ^{131}I было обнаружено по данным скрининга белорусско-американского когортного исследования жителей Беларуси, подвергшихся воздействию выбросов после аварии на Чернобыльской АЭС в возрасте до 18 лет [21]. В то же время скрининг йоддефицита у школьников в районе Семипалатинского ядерного испытательного полигона в сравнении с районами Гомеля и Нагасаки не выявил признаков тяжелого дефицита йода и трансгенерационного риска для детей, рожденных от родителей, облученных в результате испытаний [22].

Вероятность техногенного поступления радиоактивного йода в результате деятельности ПО «Маяк» для детского населения ЗАТО г. Озерск не исключается. Известно, что ^{131}I является одним из «наиболее радиационно-опасных радионуклидов, содержащихся в регламентных (и/или аварийных) выбросах ядерных реакторов и заводов по переработке облученного ядерного топлива» [23]. По данным Глаголенко Ю.В. и соавт. [24], в период с 1948 по 1967 г., когда на ПО «Маяк» отсутствовали штатные систе-

excludes the possibility of registration of thyroid disease cases that were “brought” from other territories. Besides, if we take into account better social welfare of Mayak PA personnel and possibly a more diverse food ration of their children then the range of possible exogenous factors explaining higher incidence of iodine deficiency states among the offspring becomes much narrower.

One could assume that a tendency of the exposed parents’ offspring to development of thyroid pathology results from their genetic predisposition to hypertrophy and hyperplasia of thyroid tissue that leads to clinical manifestation under unfavorable environmental factors. Thus, Troshina E.A. [26] indicates that “a genetic predisposition of endemic goiter may be realized only under corresponding external factors – iodine deficiency in environment”.

According to the evidence of Fucic A. et al [27] a statistically higher frequency of genome damage in the form of dicentric and ring chromosomes, chromosome breaks, acentric fragments, translocations and micronuclei was registered among the children born from fathers-liquidators and parents exposed to radiation due to Chernobyl accident. A significant increase of specific weight of autoimmune thyroiditis in the second generation of the offspring of females exposed to radiation close to Semipalatinsk test site was indicated by Dudareva Y.A. and Gurieva V.A. [28]. Baleva L.S. et al [29] had indicated activation of the processes of anti-thyroid antibody development and a statistically significant increase of the proportion of children with goiterously changed thyroid gland compared to the control group in their prospective morphofunctional study of thyroid in the offspring of exposed parents 20 years after the Chernobyl accident. In a retrospective study among 24588 adults and 20087 children survived after Chernobyl accident Kaminskyi O.V. et al [30] point out a significant increase of thyroid diseases in the first generation offspring of exposed parents with average cumulative dose of external gamma-radiation of 0.187 Gy.

In order to specify the issue whether there are some characteristic features of parental exposure in relation to children thyroid pathology an analysis of iodine deficiencies was performed taking into account preconceptional occupational radiation exposure. Analysis of cumulative preconceptional parental doses of external occupational gamma-radiation among children with iodine deficiency (Table 5) demonstrated

мы непрерывного контроля выбросов, «всего с выбросами в атмосферу из труб радиохимических заводов поступило от 0,72 млн Ки (минимальные оценки) до 1,3 млн Ки (максимальные) при наиболее вероятном значении 1,0 млн Ки ¹³¹I». Жители загрязненных радиоактивными выпадениями территорий подвергаются внутреннему облучению в результате не только ингаляционного поступления в период прохождения радиоактивного облака, но и потребления загрязненных продуктов питания и воды [25].

Вместе с тем, связать предполагаемое хроническое воздействие радиоактивным йодом с риском йододефицитных заболеваний у наблюдаемых детей не представляется возможным, так как в нашем исследовании до 1967 г. зарегистрированы единичные случаи данной тиреоидной патологии. К этому периоду были отнесены 2,6% (9/344) случаев в основной группе, диагностированные в 1956–1967 гг., и 4% (4/99) случаев в контроле, выявленные в 1961–1967 гг. ($p > 0,05$). Основная часть йододефицитных состояний регистрировалась после нормализации радиационной обстановки в ЗАТО. Согласно опубликованным данным, после 1970 г. на заводах ПО «Маяк» была внедрена методика непрерывного контроля выбросов с использованием специальных фильтров, время экспозиции которых составляло 3–5 суток [24].

Факт превышения йододефицитных состояний и тиреоидной патологии в целом среди потомков работников ПО «Маяк» заслуживает пристального внимания. Наряду с отсутствием разницы в климато-географических условиях, одинаковым поступлением йода из окружающей среды, едиными подходами к диагностике и профилактике йододефицитных состояний в ЗАТО, среди потомков облученных родителей патология ЩЖ возникала чаще и раньше по сравнению с детьми интактных родителей.

Медицинское обслуживание детского населения ЗАТО было организовано по единым государственным стандартам и не различалось для детей работников ПО «Маяк» и детей необлученных родителей. В отличие от заводского здравоохранения с особым статусом и регулярным наблюдением за персоналом ПО «Маяк», члены семей работников не имели каких-либо льгот. Вследствие этого более частая регистрация тиреоидной патологии из-за лучшей диспансеризации потомков работников ПО «Маяк» исключена.

Characteristics of radiation exposure in parents of the children with iodine-deficient conditions

Table 5

Характеристика радиационного воздействия у родителей детей с йододефицитными состояниями

[Таблица 5]

Preconceptional doses* [Преконцептивные дозы*]	Dose range [Диапазон доз]	<i>M</i> ± <i>s</i>	<i>Me</i> [Q25;Q75]
<i>Maternal exposure prior to conception [Преконцептивное облучение матерей]</i>			
Doses to ovaries, Gy [Дозы на яичники, Гр]	0.001–2.95	0.39±0.57	0.14 [0.04;0.49]
Doses Hp (10), Sv [Дозы Hp (10), Зв]	0.001–3.75	0.54±0.73	0.19 [0.07;0.77]
<i>Paternal exposure prior to conception [Преконцептивное облучение отцов]</i>			
Doses to testicles, Gy [Дозы на семенники, Гр]	0.005–4.21	0.49±0.69	0.20 [0.07;0.57]
Doses Hp (10), Sv [Дозы Hp (10), Зв]	0.004–4.98	0.57±0.81	0.25 [0.07;0.71]

* – accumulated preconceptional doses of external occupational gamma-radiation; *M* – mean value, *s* – mean square deviation; *Me* – median of the sampling, [Q25; Q75] – interquartile range.

[* – накопленные прекоцептивные дозы внешнего гамма-облучения на производстве; *M* – среднее значение, *s* – среднее квадратическое отклонение; *Me* – медиана выборки, [Q25; Q75] – интерквартильный размах].

a smaller dose range with slight differences of mean values compared to earlier analyzed dosimetry data for the whole group of Mayak PA workers' offspring (Table 2). Occupational doses of the fathers insignificantly exceeded preconceptional doses of the mothers.

Actually it is impossible to trace further development of thyroid non-tumor pathology in these children. Effects of iodine-deficient conditions can include development of hypothyroidism, multinodular toxic goiter and its complications, unfavorable obstetric and neonatal outcomes in adulthood [31, 32].

As for malignant transformation of thyroid pathology, according to the Ozyorsk cancer registry, thyroid cancers were further diagnosed in 0.19% (26/13880) members of the CATU child population cohort included in the studied groups, 0.16% (15/9321) of them were among Mayak PA workers' offspring and 0.24% (11/4559) were among non-exposed individuals' offspring, $p > 0.05$. Average age at diagnosis of thyroid cancer was 42.6 years in the main group (range 26.5-53.5), and 38.1 years (25.7-58.9) in the control group. The median of malignant transformation age was 44.7 years in the main group [interquartile range was 38.9-47.9], and 36.8 [28.7-45.2] in controls. Thyroid cancer was the most frequent for females: 80% (12/15) in the main group, and 90.9% (10/11) in the control group, $p > 0.05$. Analysis of cancer histologic types revealed that thyroid follicular adenocarcinoma was registered in both groups in most cases. According to the analysis of thyroid cancers in Chelyabinsk region population, along with predominance of cancer in females at the age of 30-50 and well differentiated carcinomas among histological grades, no dependence between incidence and pattern of thyroid cancer and severity of goiter endemia was registered [33].

Distribution of children's iodine deficiency cases by the categories of parental preconceptional doses of occupational external gamma-exposure revealed the fact that this thyroid pathology was mostly registered at parental preconceptional exposure in the range of low doses (fig.).

Важно также учесть, что исследуемые группы состояли только из детей, рожденных и проживавших в ЗАТО, что исключает вероятность регистрации случаев заболеваний ЩЖ, «привезённых» с других территорий. Кроме того, если принять во внимание лучшее социальное обеспечение персонала ПО «Маяк» и, по всей видимости, более разнообразный рацион питания их детей, то круг вероятных экзогенных факторов для объяснения высокой частоты йододефицитных состояний среди потомков значительно сужается.

Можно предположить, что склонность потомков облученных родителей к формированию тиреопатологии исходит из их генетической предрасположенности к гипертрофии и гиперплазии ткани ЩЖ, что при неблагоприятных факторах внешней среды проявляется клинически. Так, Трошина Е.А. [26] указывает, что «генетическая предрасположенность при эндемическом зобе может реализоваться только при наличии соответствующего внешнего фактора – дефицита йода в окружающей среде».

По данным Fucic A. et al. [27], статистически более высокая частота повреждений генома в виде дицентрических и кольцевых хромосом, хромосомных разрывов, ацентрических фрагментов, транслокаций и микроядер регистрировалась среди детей, рожденных от облученных отцов-ликвидаторов, и родителей, подвергшихся облучению в результате Чернобыльской ядерной катастрофы.

На значительное увеличение удельного веса аутоиммунных тиреоидитов у второго поколения потомков женщин, подвергшихся радиационному воздействию в районе Семипалатинского полигона, указывают Дударева Ю.А. и Гурьева В.А. [28]. Активацию процессов антитиреоидного антителообразования и статистически значимое увеличение доли детей с зобно-измененной ЩЖ по сравнению с контролем отмечают Балева Л.С. и др. [29] в проспективном морфофункциональном исследовании ЩЖ у детей-потомков облученных родителей спустя 20 лет после аварии на Чернобыльской АЭС.

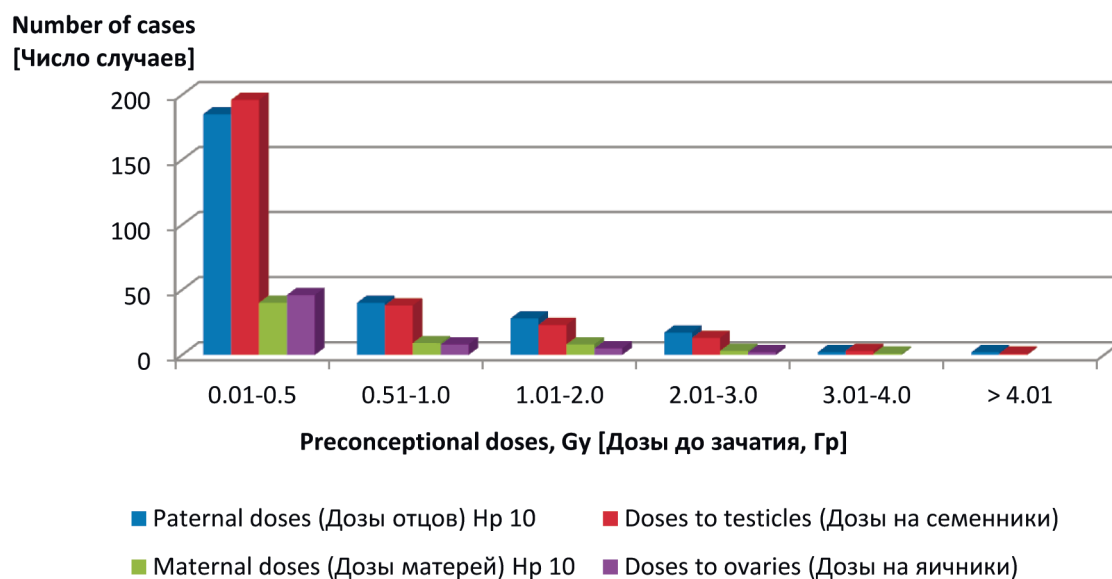


Fig. Distribution of cases of thyroid iodine deficiency disorders in Mayak PA workers' offspring taking into account parental accumulated preconceptional doses of external gamma-exposure

[Рис. Распределение числа случаев йододефицитных заболеваний ЩЖ у потомков работников ПО «Маяк» с учетом родительских накопленных прекоцептивных доз внешнего гамма-облучения]

The calculation of the relative risk of endocrine-metabolic diseases among children of exposed and non-exposed parents was carried out both in general for each subclass and separately for each nosology. Statistically significant relative risk values are presented in Table 6.

Assessment of relative risk of endocrine and metabolic pathology in exposed and non-exposed parents' offspring had indicated a significant predominance of thyroid disorders in Mayak PA workers' offspring in the whole group – RR 1.64 (CI 1.34-2.01), among boys – 2.0 (1.38-2.9) and among girls – 1.59 (1.25-2.02). Just as in the previous comparative analysis, statistically significant differences were found for the subclass “Malnutrition” that is registered more often in the group of non-exposed parents' children: RR 0.92 (0.89-0.96). RR values in other subclasses of endocrine and metabolic disorders did not reveal any essential difference between the groups.

Risk of thyroid diseases related to iodine deficiency among the offspring of Mayak PA personnel was almost two times higher than the values in the control group: RR 1.92 (CI 1.3-2.84) among boys, 1.68 (1.29-2.2) among girls, 1.7 (1.36-2.12) in the whole group. There was no statistically significant increase in the risk of other non-tumor thyroid diseases.

В ретроспективном исследовании среди 24 588 взрослых и 20 087 детей, выживших после аварии на ЧАЭС, Каминский О.В. et al. [30] акцентируют внимание на значимом превышении болезней ЩЖ у первого поколения облученных родителей, средняя суммарная доза внешнего гамма-облучения которых составила 0,187 Гр.

С целью уточнения вопроса, существуют ли какие-либо особенности прекоцептивного облучения родителей при детской тиреопатологии, был проведен анализ йододефицитных состояний с учетом доз профессионального радиационного воздействия. Анализ суммарных прекоцептивных доз производственного внешнего гамма-облучения родителей детей с йододефицитом (табл. 5) показал меньший диапазон доз, но малые отличия средних значений в сравнении с ранее рассмотренными дозиметрическими данными для всей группы потомков работников ПО «Маяк» (см. табл. 2). Профессиональные дозы отцов незначимо превышали дозы прекоцептивного облучения матерей.

Распределение случаев йододефицита у детей по категориям родительских прекоцептивных доз внешнего гамма-облучения на производстве показало, что чаще всего данная тиреоидная патология регистрировалась

Table 6

Relative risk of endocrine and metabolic disorders

[Таблица 6

Относительный риск эндокринно-обменных расстройств]

Sex [Пол]	Group [Группа]	Outcome [Исход]		RR (95%CI) [ОР (95% ДИ)]
		Found [Есть]	Not found [Нет]	
Disorders of thyroid gland [Болезни щитовидной железы] (E00-E07)				
Boys [Мальчики]	Exposed* [Экспонированные*]	158	4618	2.0** (1.38-2.9)
	Unexposed [Неэкспонированные]	33	1963	
Girls [Девочки]	Exposed [Экспонированные]	242	4303	1.59** (1.25-2.02)
	Unexposed [Неэкспонированные]	86	2477	
Both [Оба пола]	Exposed [Экспонированные]	400	8921	1.64** (1.34-2.01)
	Unexposed [Неэкспонированные]	119	4440	
Malnutrition [Недостаточность питания] (E40-E46, E50-E64)				
Boys [Мальчики]	Exposed [Экспонированные]	2056	2720	0.94** (0.89-0.99)
	Unexposed [Неэкспонированные]	912	1084	
Girls [Девочки]	Exposed [Экспонированные]	1990	2555	0.91** (0.86-0.96)
	Unexposed [Неэкспонированные]	1231	1332	
Both [Оба пола]	Exposed [Экспонированные]	4046	5275	0.92** (0.89-0.96)
	Unexposed [Неэкспонированные]	2143	2416	
Iodine-deficiency-related thyroid disorders and allied conditions [Болезни щитовидной железы, связанные с йодной недостаточностью, и сходные состояния] (E01)				
Boys [Мальчики]	Exposed [Экспонированные]	138	4638	1.92** (1.3-2.84)
	Unexposed [Неэкспонированные]	30	1966	
Girls [Девочки]	Exposed [Экспонированные]	206	4339	1.68** (1.29-2.2)
	Unexposed [Неэкспонированные]	69	2494	
Both [Оба пола]	Exposed [Экспонированные]	344	8977	1.70** (1.36-2.12)
	Unexposed [Неэкспонированные]	99	4460	

* – children of the parents exposed to preconceptional occupation radiation, ** - statistically significant differences with comparison group.
[* – дети, чьи родители подверглись прекоцептивному облучению на производстве, ** - статистически значимые различия с группой сравнения].

As the result, risk of such outcomes as thyroid pathology including thyroid disorders related to iodine deficiency in Mayak PA workers' offspring aged under 15 was statistically significantly higher compared to the group of children without a factor of parental preconceptional industrial exposure.

The factor analysis we had performed earlier in the cohort of Mayak PA female workers' offspring indicated a significant role of preconceptional occupational contact with ionizing radiation sources in development of endocrine pathology in children (dispersion 6.2%) and a high factor weight of the variable "Dose to gonads" (0.8) characterizing maternal preconceptional accumulated absorbed dose of external gamma-exposure to ovaries [34].

To date explanation of pathophysiological mechanisms resulting in more frequent and earlier dysfunction of endocrine system, in particular, of a thyroid as a target organ in children of individuals exposed prior to conception, is a difficult task. Certain mechanisms of radiation effects to human gametogenesis and transgenerational transfer of radiation-induced effects remain poorly examined.

Potential of thyroid tissue to struma formation could be caused by damages in regulating mechanisms of hypothalamic-pituitary thyroid system in offspring. It is known that "importance of iodine for body growth and development determines rigid regulating mechanisms of its intake, distribution and homeostasis" [35]. Under conditions of iodine deficiency, biosynthesis of thyroid hormones regulated by hypothalamic-pituitary thyroid system on the principle of feedback is disrupted, and long-term hyperproduction of thyroid stimulating hormones leads to a goitrous effect. Therefore, genetic features of neuroendocrine regulation in offspring whose parents were exposed to preconceptional radiation could result in more frequent and earlier thyrocytes proliferation. Solntseva A.V. and Yakimovich N.I. point at more severe manifestations of even mild case of iodine deficiency in children with genetically modified function of hypothalamic-pituitary thyroid system and biosynthesis of thyroid hormones [36].

Epigenetic modifiers are considered as triggers of endocrine and metabolic pathology along with genetic predisposition and external effects of environmental factors [37] as far as "epigenetic and epigenomic genome modifications act as an interface between environment and organism" [38]. Tyrtova L.V. et al. [39], when describing genetic and epigenetic aspects of obesity and metabolic syndrome, note that DNA epigenetic features can be inherited with full penetrability (100%), and in distinction from genetic information, can be reproduced within 3-4 generations. Scientific search of long term genetic and epigenetic disorders in radiation-exposed individuals and their offspring is continued [40].

Conclusions

The retrospective epidemiological analysis of endocrine and metabolic disorders was performed for 13 880 children aged under 15 born in CATU Ozyorsk in 1949-1973; parents of 9321 of these children were exposed to long term preconceptional occupational radiation at Mayak PA.

A comparative assessment of the class "Endocrine, nutritional and metabolic diseases" had revealed the following special features:

1. The subclass "Malnutrition" presented by rickets and mild protein-calorie deficiency cases took the lead in both

при прекоцептивном облучении родителей в области малых доз (рис.).

В настоящее время не существует возможности проследить дальнейшее развитие неопухоловой патологии ЩЖ среди этих детей. Последствиями йоддефицитных состояний могут быть формирование во взрослом возрасте гипотиреоза, многоузлового токсического зоба и его осложнений, неблагоприятные акушерские и неонатальные исходы [31, 32].

Что касается малигнизации тиреоидной патологии, то, согласно Канцер-регистру г. Озерска, злокачественные неоплазмы ЩЖ были диагностированы впоследствии среди 0,19% (26/13880) членов когорты детского населения ЗАТО, вошедших в исследуемые группы, из них 0,16% (15/9321) среди потомков работников ПО «Маяк» и 0,24% (11/4559) среди потомков необлученных лиц, $p > 0,05$. Средний возраст установления диагноза ЗНО ЩЖ в основной группе был 42,6 года (диапазон 26,5–53,5 лет), в группе сравнения – 38,1 лет (25,7–58,9). Медиана возраста малигнизации составила в основной группе 44,7 года [интерквартильный размах 38,9–47,9], в контроле – 36,8 [28,7–45,2]. Наиболее часто тиреоидный рак развивался у женщин: 80% (12/15) в основной группе, 90,9% (10/11) в группе сравнения, $p > 0,05$. Анализ гистологических типов рака показал, что в обеих группах чаще всего наблюдалась фолликулярная аденокарцинома ЩЖ. Согласно анализу тиреоидного рака у жителей Челябинской области, наряду с преобладанием рака у женщин в возрасте 30–50 лет и высокодифференцированных карцином среди гистологических форм, показано отсутствие зависимости частоты и характера распространения ЗНО ЩЖ от выраженности зобной эндемии [33].

Расчет относительного риска эндокринно-обменных болезней среди детей экспонированных и неэкспонированных родителей был проведен как в целом для каждого подкласса, так и отдельно для каждой нозологии. Статистически значимые величины относительного риска представлены в таблице 6.

Оценка относительного риска выделила значимое преобладание болезней ЩЖ у потомков работников ПО «Маяк» в целом по группе – ОР 1,64 (ДИ 1,34–2,01), среди мальчиков – 2,0 (1,38–2,9) и среди девочек – 1,59 (1,25–2,02).

Как и в предыдущем сравнительном анализе, статистически значимые различия были найдены для подкласса «Недостаточность питания», чаще регистрируемого в группе детей неэкспонированных родителей: ОР 0,92 (0,89–0,96). Показатели ОР среди остальных подклассов эндокринно-обменных расстройств не обозначили существенной разницы между группами.

Среди нозологических форм риск болезнью щитовидной железы, связанных с йодной недостаточностью, среди потомков персонала ПО «Маяк» почти вдвое превышал показатели в контроле: ОР 1,92 (ДИ 1,3–2,84) среди мальчиков, 1,68 (1,29–2,2) среди девочек, 1,7 (1,36–2,12) в целом по группе. Статистически значимого увеличения риска других неопухоловых заболеваний ЩЖ не было обнаружено.

В итоге среди потомков персонала ПО «Маяк» в возрасте до 15 лет риск исходов в виде тиреоидной патологии, в том числе болезней ЩЖ, связанных с йодной недостаточностью, был статистически значимо выше, чем в

groups, with statistically significant excess in the control group among girls ($p=0.012$) and in the whole group ($p<0.01$);

2. The subclass "Disorders of thyroid gland" with incidence of thyroid pathology significantly higher in Mayak PA workers' offspring by the sum of observation and by sex ($p<0.001$) was in the second place;

3. Among thyroid diseases iodine-deficient conditions with the spectrum mainly presented by diffuse nontoxic thyroid growth with long term preservation of euthyroid status were mostly registered in both groups.

4. In the group of Mayak PA workers' offspring, iodine-deficient thyroid states were registered significantly more often ($p<0.001$) and with earlier disease onset compared to the controls.

5. Distribution of iodine-deficient thyroid conditions in children by the categories of parental preconceptional accumulated doses of external occupational gamma-radiation revealed that the most cases related to parental preconceptional exposure in the range of low doses.

6. No difference between incidence of thyroid pathology malignant transformation in the groups was found: thyroid cancers were further diagnosed in 0.16% (15/9321) of Mayak PA workers' offspring and in 0.24% (11/4559) of non-exposed individuals' offspring ($p>0.05$) with the average age of manifestation 42.6 and 38.1 years, correspondingly, and the most frequent histological type in both groups was thyroid follicular adenocarcinoma.

7. Calculation of relative risk indicated a statistical significance of effect of parental prolonged preconceptional occupational contact with ionizing radiation sources on the development of thyroid pathology in general and iodine-deficient thyroid states, in particular, in the offspring.

It should be noted that children in both groups were born and resided in CATU and, consequently, were in the same conditions of iodine intake from environment, medical care, possible technogenic radiation exposure. Therefore, all other conditions being equal, significant increase of iodine-deficient thyroid pathology among Mayak PA workers' offspring cannot be explained by external factors and, most likely, is the evidence of increased susceptibility of thyroid tissue to iodine deficiency and genetic predisposition to its hypertrophy and hyperplasia.

It is necessary to continue research of late effects of long term radiation exposure in order to understand the contribution of parental radiation exposure to pathogenesis of offspring's health problems, including genetic and epigenetic predispositions for neuroendocrine imbalance, increased sensibility of the endocrine system and, as a result, earlier development of endocrine and metabolic disorders.

Revealed special characteristics of endocrine and metabolic pathology in Mayak PA workers' children can be used for medical monitoring of the offspring of individuals chronically exposed to occupational radiation for formation of the risk groups, timely registration and treatment of these states.

Information about the authors' personal contribution to the paper

Sosnina S.F. – research concept; data analysis; writing the text;

Okatenko P.V. – formation of the study groups; statistical data analysis;

группе детей, где отсутствовал фактор преконцептивного облучения родителей на производстве.

Проведенный нами ранее факторный анализ в когорте потомков работниц ПО «Маяк» показал значимую роль преконцептивного профессионального контакта с источниками ионизирующих излучений в развитии эндокринной патологии у детей (6,2% дисперсии) и высокую факторную нагрузку переменной «Доза на гонады» (0,8), характеризующей материнскую преконцептивную накопленную поглощенную дозу внешнего гамма-облучения на яичники [34].

Объяснение патофизиологических механизмов, приводящих к более частой и ранней дисфункции эндокринной системы и, в частности, щитовидной железы как органа-мишени, у детей преконцептивно облученных лиц является на данный момент трудноразрешимой задачей. Конкретные механизмы воздействия облучения на гаметогенез человека и трансгенерационный перенос радиационно-индуцированных эффектов остаются не до конца исследованными.

Склонность ткани ЩЖ к формированию струмы могла быть обусловлена нарушениями механизмов регуляции гипоталамо-гипофизарно-тиреоидной системы у потомков. Известно, что «важность йода для роста и развития организма предопределяет наличие жёстких механизмов регуляции его поступления, распределения и гомеостаза» [35]. В условиях йододефицита нарушается биосинтез гормонов ЩЖ, в свою очередь, регулируемых гипоталамо-гипофизарно-тиреоидной системой по принципу обратной связи, и длительная гиперпродукция тиреотропного гормона вызывает струмогенный эффект. Вследствие этого генетические особенности нейроэндокринной регуляции у потомков, чьи родители подверглись преконцептивному радиационному воздействию, могли привести к более частой и ранней пролиферации тиреоцитов. На более тяжелые проявления даже легкой степени йододефицита у детей с генетически измененным функционированием гипоталамо-гипофизарно-тиреоидной системы и биосинтезом гормонов ЩЖ указывают Солнцева А.В. и Якимович Н.И. [36].

Наряду с генетической предрасположенностью и внешним воздействием факторов окружающей среды, в качестве триггеров эндокринно-обменной патологии рассматриваются эпигенетические модификации [37], поскольку «эпигенетические и эпигеномные модификации генома выступают в качестве интерфейса между средой и организмом» [38]. Тыртова Л.В. и др. [39], описывая генетические и эпигенетические аспекты ожирения и метаболического синдрома, отмечают, что эпигенетические особенности ДНК могут передаваться по наследству с полной (100%) пенетрантностью и, в отличие от генетической информации, могут воспроизводиться в течение не более 3–4 поколений. Научный поиск долгосрочных генетических и эпигенетических нарушений у подвергшихся радиационному воздействию людей и их потомков продолжается [40].

Заключение

Ретроспективный эпидемиологический анализ эндокринно-обменных нарушений проведен среди 13 880 детей до 15-летнего возраста, родившихся в ЗАТО г. Озерск в 1949–1973 гг., из которых у 9321 ребенка ро-

Sokolnikov M.E. – general project management; approval of the paper final version for publication.

Information on conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Information on the financial support

The study was not sponsored.

References

1. Palyga GF, Chibisova OF, Ivanov VL, Dergilev AA, Zhavoronkov LP, Panfilova VV, et al. Effect of irradiation of male rats on the development of posterities of two generations. *Radiatsiya i risk (Byulleten' Nacional'nogo radiacionno-epidemiologicheskogo registra) = Radiation and Risk (Bulletin of the National Radiation and Epidemiological Registry)*. 2011;20(1): 19-23. (In Russian).
2. Dubrova YE, Sarapultseva EI. Radiation-induced transgenerational effects in animals. *International Journal of Radiation Biology*. 2020 Aug 3:1-7. DOI: 10.1080/09553002.2020.1793027.
3. Yushkova E. Radiobiological features in offspring of natural populations of *Drosophila melanogaster* after Chernobyl accident. *Environmental and Molecular Mutagenesis*. 2022 Feb; 63(2): 84-97. DOI: 10.1002/em.22476.
4. Nakamura N, Suyama A, Noda A, Kodama Y. Radiation effects on human heredity. *Annual Review of Genetics*. 2013; 47: 33-50. DOI: 10.1146/annurev-genet-111212-133501.
5. Brenner DJ. Should we worry about inherited radiation risks? *The Lancet. Oncology*. 2015 Oct; 16(13): 1275-6. DOI: 10.1016/S1470-2045(15)00270-3.
6. Tatsukawa Y, Cologne JB, Hsu WL, Yamada M, Ohishi W, Hida A, et al. Radiation risk of individual multifactorial diseases in offspring of the atomic-bomb survivors: a clinical health study. *Journal of Radiological Protection: Official Journal of the Society for Radiological Protection*. 2013 Jun; 33(2): 281-93. DOI: 10.1088/0952-4746/33/2/281.
7. Kaminskyi OV, Kopylova OV, Afanasyev DE, Muraviova IM, Chikalova IG, Dombrovska NS. Clinical-metabolic and hormonal relationships between parathyroid disease and other non-cancerous endocrine disorders in the Chernobyl NPP accident survivors. *Problems of Radiation Medicine and Radiobiology* 2021 Dec; 26: 410-25. DOI: 10.33145/2304-8336-2021-26-410-425.
8. Herrmann T, Thiede G, Trott KR, Voigtman L. Offsprings of preconceptionally irradiated parents. Final report of a longitudinal study 1976-1994 and recommendations for patients' advisory. *Strahlentherapie und Onkologie*. 2004 Jan; 180(1): 21-30. DOI: 10.1007/s00066-004-1223-4.
9. Draper G. Preconception exposures to potential germ-cell mutagens. *Radiation Protection Dosimetry*. 2008; 132 (2): 241-5. DOI: 10.1093/rpd/ncn256.
10. Sosnina SF, Kabirova NR, Okatenko PV, Rogacheva SA, TsarevaYuV, Gruzdeva EA, et al. Ozyorsk Children's Health register: development results, management guidelines, potential and prospects. *Meditsina ekstremal'nykh situatsii = Extreme Medicine*. 2017; 61(3): 95-103. (In Russian).
11. Napier BA. The Mayak Worker Dosimetry System (MWDS-2013): an introduction to the documentation. *Radiation Protection Dosimetry*. 2017; 176 (1-2): 6-9.
12. Fomin EP, Okatenko PV, Koshurnikova NA. Retrospective development of the Cancer Register for Ozyorsk population and its use at analyzing morbidity rate of malignant tumors over the period from 1948 to 2005. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Radiation Safety Problems*. 2007;4: 54-62. (In Russian).
13. Zelinskaya DI, Shiryayeva LV, Terleckaya RN. Current approaches to improving medical care to children with endocrine system diseases. *Zdravoohranenie Rossijskoj Federatsii = Health Care of the Russian Federation*. 2012; 3: 34-8. (In Russian).

дители подверглись прекоцептивному пролонгированному производственному радиационному воздействию на ПО «Маяк».

Сравнительная оценка класса «Болезни эндокринной системы, расстройств питания и нарушения обмена веществ» показала следующие особенности:

1. Лидирующее место в обеих группах занимал подкласс «Недостаточность питания», представленный случаями рахита и белково-энергетической недостаточности легкой степени, со статистически значимым превышением в группе сравнения среди девочек ($p=0,012$) и в целом по группе ($p<0,01$).

2. Вторые позиции занимал подкласс «Болезни щитовидной железы», в котором частота тиреоидной патологии была значимо выше среди потомков работников ПО «Маяк» по сумме наблюдений и при разделении по полу ($p<0,001$).

3. Среди болезней ЩЖ наиболее часто в обеих группах регистрировались йододефицитные состояния, спектр которых был, в основном, представлен диффузным нетоксическим увеличением ЩЖ с длительным сохранением эутиреоидного статуса.

4. В группе потомков персонала ПО «Маяк» йододефицитные тиреоидные состояния регистрировались значимо чаще ($p<0,001$) и с более ранним началом заболевания, чем в контроле.

5. Распределение йододефицитных состояний ЩЖ у детей по категориям прекоцептивных накопленных доз внешнего гамма-облучения родителей на производстве показало, что большинство случаев относились к прекоцептивному облучению в области малых доз.

6. Разницы в группах по частоте малигнизации тиреоидной патологии не найдено: ЗНО ЩЖ были диагностированы впоследствии среди 0,16% (15/9321) потомков работников ПО «Маяк» и 0,24% (11/4559) потомков необлученных лиц ($p>0,05$) со средним возрастом манифестации в 42,6 и 38,1 года соответственно, и наиболее частым гистологическим типом в виде фолликулярной аденокарциномы ЩЖ в обеих группах.

7. Расчет относительного риска показал статистическую значимость влияния фактора прекоцептивного пролонгированного производственного контакта родителей с источниками ионизирующих излучений на развитие у потомков тиреоидной патологии в целом и йододефицитных состояний ЩЖ в частности.

Важно заметить, что дети в обеих группах родились и проживали в ЗАТО и, соответственно, находились в одинаковых условиях поступления йода из окружающей среды, медицинского обслуживания, возможного техногенного радиационного воздействия. В связи с этим при прочих равных условиях значимое увеличение йододефицитной патологии ЩЖ у потомков персонала ПО «Маяк» не может быть объяснено внешними причинами и, скорее всего, свидетельствует о повышенной чувствительности ткани ЩЖ к дефициту йода и генетической предрасположенности к её гипертрофии и гиперплазии.

Продолжение изучения отдаленных последствий пролонгированного действия радиации необходимо для понимания вклада радиационного воздействия в патогенез отклонений здоровья потомков, в том числе генетических и эпигенетических предпосылок для нейроэндокринного дисбаланса, повышенной уязвимости эндокринной си-

14. Volosnikov DK, Sosnina SF. The medical and social characteristics of families with children of adolescent age residing in the closed administrative territorial formation Ozersk. *Sotsiologiya meditsiny = Sociology of Medicine*. 2010; 2: 59-61 (In Russian).
15. Tukov YA, Matveeva ES, Tarasova IS. Peculiarities of socially important diseases spread among schoolchildren depending on their sex and age. *Uralskiy medicinskiy zhurnal = Ural Medical Journal*. 2013; 9 (114): 94-9. (In Russian).
16. Baranov AA, Namazova-Baranova LS, Albitskii VYu, Terletskaia RN, Antonova EV. The condition and problems of adolescents' health of Russia. *Problemy social'noj gigieny, zdavoohraneniya i istorii mediciny = Problems of Social Hygiene, Public Health and History of Medicine*. 2014; 22 (6): 10-4. (In Russian).
17. Markova AI, Lyakhovich AV, Gutman MR. Parental quality of life as a determinant of children's health. *Gigiena i sanitariya = Hygiene and Sanitation*. 2012; 91 (2): 55-61. (In Russian).
18. Dolgushina NA, Kuvshinova IA. Assessment of iodine deficiency in children on the territory of the Chelyabinsk region and in the city of Magnitogorsk. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*. 2017; 4: 39. (In Russian).
19. Platonova NM. Iodine deficiency: current status. *Klinicheskaya i eksperimentalnaya tiroidologiya = Clinical and Experimental Thyroidology*. 2015; 11 (1): 12-21. (In Russian).
20. Eliseeva YV, Istomin AV, Milushkina OY, Eliseev YY. Hygienic safety of the environment and the formation of the health of children and adolescents. Saratov: Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky (Razumovsky University); 2016. 164 p. (In Russian).
21. Chirikova E, McConnell RJ, O'Kane P, Yauseyenko V, Little MP, Minenko V, et al. Association between exposure to radioactive iodine after the Chernobyl accident and thyroid volume in Belarus 10-15 years later. *Environmental Health: a Global Access Science Source*. 2022 Jan 7; 21(1): 5. doi: 10.1186/s12940-021-00820-0.
22. Hamada A, Takamura N, Meirmanov S, Alipov G, Mine M, Ensebaev R, et al. No evidence of radiation risk for thyroid gland among schoolchildren around Semipalatinsk Nuclear Testing Site. *Endocrine Journal*. 2003 Feb; 50(1): 85-9. doi: 10.1507/endocrj.50.85.
23. Ilyin LA, Arhangelskaya GV, Konstantinov YuO, Likhtarev IA. Radioactive iodine in the problem of radiation safety. Moscow: Atomizdat; 1972. 272 p. (In Russian).
24. Glagolenko YV, Drozhko EG, Mokrov YG, Pyatin NP, Rovny SI, Anspaugh LR, et al. Reconstruction of ¹³¹I releases from stacks of the radiochemical plant of the Mayak Production Association for the period from 1948 to 1967. *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti = Radiation Safety Problems*. 2008; Special issue: 52-61. (In Russian).
25. Zvonova IA. Internal doses to the public in the Fukushima prefecture from the Fukushima Daiichi NPP accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13 (3): 98-109. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-98-109.
26. Troshina EA. Diffuse euthyroid goiter. The algorithms of treatment and prophylaxis with iodine preparations. A lecture. *Problemy Endocrinologii = Problems of Endocrinology*. 2014;60(5): 49-56. (In Russian).
27. Fucic A, Aghajanyan A, Druzhinin V, Minina V, Neronova E. Follow-up studies on genome damage in children after Chernobyl nuclear power plant accident. *Archives of Toxicology*. 2016 Sep; 90(9): 2147-59. DOI: 10.1007/s00204-016-1766-z.
28. Dudareva YA, Gurieva VA. Evaluation of Thyroid in Women Are at Risk Radiation Exposure and Their Descendants in Two Generations. *Ekologiya cheloveka = Human Ecology*. 2015;10: 9-13. (In Russian).
29. Baleva LS, Yakovleva IN, Sipyagina AE, Karahan NM, Danilycheva LI, Zemlyanskaya ZK, et al. Morphofunctional

стемы и, как следствие, более раннего развития эндокринно-обменных нарушений.

Выявленные особенности эндокринно-обменной патологии у детей работников ПО «Маяк» могут быть использованы при медицинском мониторинге потомков лиц, подвергшихся хроническому радиационному воздействию на производстве, для формирования групп риска, своевременной регистрации и лечения данных состояний.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Соснина С.Ф. – концепция исследования; анализ данных; написание текста статьи;

Окatenко П.В. – формирование исследуемых групп, статистический анализ данных;

Сокольников М.Э. – общее руководство проектом, утверждение окончательного варианта статьи для публикации.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Литература

1. Палыга Г.Ф., Чибисова О.Ф., Иванов В.Л., и др. Реализация лучевых эффектов в онтогенезе потомства двух поколений самцов, половые клетки которых облучены однократно в нестерилизующих дозах на стадии сперматид // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2011. Т. 20, № 1. С. 19–23.
2. Dubrova YE., Sarapultseva E.I. Radiation-induced transgenerational effects in animals // International Journal of Radiation Biology. 2020. Aug 3. P. 1–7. DOI: 10.1080/09553002.2020.1793027.
3. Yushkova E. Radiobiological features in offspring of natural populations of *Drosophila melanogaster* after Chernobyl accident // Environmental and Molecular Mutagenesis. 2022. Vol. 63, No. 2. P. 84–97. DOI: 10.1002/em.22476.
4. Nakamura N., Suyama A., Noda A., Kodama Y. Radiation effects on human heredity // Annual Review of Genetics. 2013. Vol. 47. P. 33–50. DOI: 10.1146/annurev-genet-111212-133501.
5. Brenner D.J. Should we worry about inherited radiation risks? // The Lancet. Oncology. 2015. Vol. 16, No. 13. P. 1275-1276. DOI: 10.1016/S1470-2045(15)00270-3.
6. Tatsukawa Y., Cologne J.B., Hsu W.L., et al. Radiation risk of individual multifactorial diseases in offspring of the atomic-bomb survivors: a clinical health study // Journal of Radiological Protection: Official Journal of the Society for Radiological Protection. 2013. Vol. 33, No. 2. P. 281–293. DOI: 10.1088/0952-4746/33/2/281.
7. Kaminsky O.V., Kopylova O.V., Afanasyev D.E., et al. Clinical-metabolic and hormonal relationships between parathyroid disease and other non-cancerous endocrine disorders in the Chernobyl NPP accident survivors // Problems of Radiation Medicine and Radiobiology. 2021. Vol. 26. P. 410–425. DOI: 10.33145/2304-8336-2021-26-410-425.
8. Herrmann T., Thiede G., Trott K.R., Voigtmann L. Offsprings of preconceptually irradiated parents. Final report of a longitudinal study 1976-1994 and recommendations for patients' advisory // Strahlentherapie und Onkologie. 2004. Vol. 180, No. 1. P. 21–30. DOI: 10.1007/s00066-004-1223-4.
9. Draper G. Preconception exposures to potential germ-cell mutagens // Radiation Protection Dosimetry. 2008. Vol. 132, No. 2. P. 241–245. DOI: 10.1093/rpd/ncn256.

- changes of the thyroid gland in children exposed to x-rays as a result of the Chernobyl nuclear power plant accident and children born by exposed parents. *Voprosy prakticheskoy pediatrii = Clinical Practice in Pediatrics*. 2012;7(4): 13-6. (In Russian).
30. Kaminskyi OV, Kopylova OV, Afanasyev DE, Pronin OV. Non cancer thyroid and other endocrine disease in children and adults exposed to ionizing radiation after the ChNPP accident. *Problems of Radiation Medicine and Radiobiology*. 2015 Dec; 20: 341-55.
 31. Santos JAR, Christoforou A, Trieu K, McKenzie BL, Downs S, Billot L, et al. Iodine fortification of foods and condiments, other than salt, for preventing iodine deficiency disorders. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2019 Feb 12; 2(2): CD010734. DOI: 10.1002/14651858.CD010734.pub2.
 32. Silva de Morais N, Ayres Saraiva D, Corcino C, Berbara T, Schtscherbyna A, Moreira K, et al. Consequences of Iodine Deficiency and Excess in Pregnancy and Neonatal Outcomes: A Prospective Cohort Study in Rio de Janeiro, Brazil. *Thyroid: Official Journal of the American Thyroid Association*. 2020 Dec;30(12): 1792-1801. DOI: 10.1089/thy.2019.0462.
 33. Kulaev I.A. Clinical and morphological characteristics of malignant neoplasms of the thyroid gland and their combination with non-tumor pathology of the organ in residents of the Chelyabinsk region: abstract. diss. ... Doctor of Medical Sciences. Chelyabinsk; 2005, 48 p.
 34. Sosnina SF, Okatenko PV. The endocrine metabolic disorders in children of female workers of nuclear energetics enterprise. *Zdravookhranenie Rossiiskoi Federatsii = Health Care of the Russian Federation*. 2018;62(4): 211-9. (In Russian). DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0044-197X-2018-62-4-211-219>.
 35. Skalnaya MG. Iodine: biological role and significance for medical practice. *Mikroelementy v medicine = Microelements in Medicine*. 2018;19(2): 3-11. (In Russian).
 36. Solnceva AV, Yakimovich NI. Iodine deficiency conditions in children. Minsk: BSMU; 2008. 28 p. (In Russian).
 37. Koehler VF, Bojunga J. Autoimmunthyreoiditis [Autoimmune thyroid disease]. *Deutsche medizinische Wochenschrift*. 2021 Oct;146(20): 1329-36. DOI: 10.1055/a-1258-5674.
 38. Patkin EL, Sofronov GA. Environment-dependent human diseases: the epigenetic mechanisms of their development and inheritance. *Medicinskij akademicheskij zhurnal = Medical Academic Journal*. 2015;15(3): 7-23. (In Russian).
 39. Tyrtova LV, Parshina NV, Skobeleva KV. Genetic and epigenetic aspects of obesity and metabolic syndrome, possibilities of prevention in childhood. *Pediatr = Pediatrician*. 2013;4(2): 3-11. (In Russian).
 40. Kucher OV, Vidyborets SV. Long/term genetic and epigenetic disorders in persons exposed to ionizing radiation and their descendants (review). *Problems of Radiation Medicine and Radiobiology*. 2021 Dec;26: 36-56. DOI: 10.33145/2304-8336-2021-26-36-56.
 10. Sosnina С.Ф., Кабирова Н.Р., Окатенко П.В., и др. Регистр здоровья детского населения г. Озёрска: результаты разработки, принципы ведения, возможности и перспективы // Медицина экстремальных ситуаций. 2017. Т. 61, № 3. С. 95–103.
 11. Napier В.А. The Mayak Worker Dosimetry System (MWDS-2013): an introduction to the documentation // Radiation Protection Dosimetry. 2017. Vol. 176, No. 1–2. P. 6–9. DOI: 10.1093/rpd/ncx020.
 12. Фомин Е.П., Окатенко П.В., Кошурникова Н.А. Опыт ретроспективного создания канцер-регистра для населения г. Озерска и анализ показателей заболеваемости злокачественными новообразованиями на его основе за период с 1948 по 2005 гг. // Вопросы радиационной безопасности. 2007. № 4. С. 54–62.
 13. Зелинская Д.И., Ширяева Л.В., Терлецкая Р.Н. Современные подходы к совершенствованию медицинской помощи детям с заболеваниями эндокринной системы // Здоровоохранение Российской Федерации. 2012. № 3. С. 34–38.
 14. Волосников Д.К., Sosnina С.Ф. Медико-социальная характеристика семей, проживающих в закрытом административном территориальном образовании (г. Озёрск), имеющих детей подросткового возраста // Социология медицины. 2010. № 2. С. 59–61.
 15. Тюков Ю.А., Матвеева Е.С., Тарасова И.С. Особенности распространения социально значимых заболеваний среди городских школьников в зависимости от пола и возраста // Уральский медицинский журнал. 2013. № 9 (114). С. 94–99.
 16. Баранов А.А., Намазова-Баранова Л.С., Альбицкий В.Ю., и др. Состояние и проблемы здоровья подростков в России // Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины. 2014. Т. 22. № 6. С. 10–14.
 17. Маркова А.И., Ляхович А.В., Гутман М.Р. Образ жизни родителей как детерминанта здоровья детей // Гигиена и санитария. 2012. Том 91, № 2. С. 55–61.
 18. Долгушина Н.А., Кувшинова И.А. Оценка йодного дефицита у детей на территории Челябинской области и в городе Магнитогорске // Современные проблемы науки и образования. 2017. № 4. С. 30–39.
 19. Платонова Н.М. Йодный дефицит: современное состояние проблемы // Клиническая и экспериментальная тиреоидология. 2015. Т.11, № 1. С. 12–21.
 20. Елисеева Ю.В., Истомин А.В., Милушкина О.Ю., Елисеев Ю.Ю. Гигиеническая безопасность среды обитания и формирование здоровья детей и подростков. Саратов: Саратовский государственный медицинский университет имени В.И. Разумовского, 2016. 164 с.
 21. Chirikova E., McConnell R.J., O’Kane P., et al. Association between exposure to radioactive iodine after the Chernobyl accident and thyroid volume in Belarus 10-15 years later // Environmental Health: a Global Access Science Source. 2022. Vol. 21, No. 1. P. 5. DOI: 10.1186/s12940-021-00820-0.
 22. Hamada A., Takamura N., Meirmanov S., et al. No evidence of radiation risk for thyroid gland among schoolchildren around Semipalatinsk Nuclear Testing Site // Endocrine Journal. 2003. Vol. 50, No.1. P. 85–89. DOI: 10.1507/endocrj.50.85.
 23. Ильин Л.А., Архангельская Г.В., Константинов Ю.О., Лихтарев И.А. Радиоактивный йод в проблеме радиационной безопасности. М.: Атомиздат, 1972. 272 с.
 24. Глаголенко Ю.В., Дрожко Е.Г., Мокров Ю.Г., и др. Реконструкция выбросов в атмосферу 131I из труб радиохимического производства ПО «Маяк» за период с 1948 по 1967 гг. // Вопросы радиационной безопасности. 2008. Специальный выпуск. С. 52–61.
 25. Звонова И.А. Дозы внутреннего облучения у населения префектуры Фукусима вследствие аварии на АЭС Фукусима-Дайичи // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 98–109. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-98-109.

Received: June 16, 2022

26. Трошина Е.А. Диффузный эутиреоидный зоб. Алгоритмы лечения и профилактика препаратами йода. Лекция // Проблемы эндокринологии. 2014. Т. 60, № 5. С. 49–56.
27. Fucic A., Aghajanyan A., Druzhinin V., et al. Follow-up studies on genome damage in children after Chernobyl nuclear power plant accident // Archives of Toxicology. 2016. Vol 90, No. 9. P. 2147–2159. DOI: 10.1007/s00204-016-1766-z.
28. Дударева Ю.А., Гурьева В.А. Оценка состояния щитовидной железы у женщин, находившихся в зоне радиационного воздействия, и их потомков в двух поколениях // Экология человека. 2015. № 10. С. 9–13.
29. Балева Л.С., Яковлева И.Н., Сипягина А.Е., и др. Морфофункциональные изменения щитовидной железы у детей, облученных в результате аварии на Чернобыльской АЭС, и детей-потомков облученных родителей // Вопросы практической педиатрии. 2012. Т. 7, № 4. С. 13–16.
30. Kaminskiy O.V., Kopylova O.V., Afanasyev D.E., Pronin O.V. Non cancer thyroid and other endocrine disease in children and adults exposed to ionizing radiation after the ChNPP accident // Problems of Radiation Medicine and Radiobiology. 2015. Vol. 20. P. 341–355.
31. Santos J.A.R., Christoforou A., Trieu K., et al. Iodine fortification of foods and condiments, other than salt, for preventing iodine deficiency disorders // The Cochrane Database of Systematic Reviews. 2019. Vol. 2, No. 2. CD010734. DOI: 10.1002/14651858.CD010734.pub2.
32. Silva de Moraes N., Ayres Saraiva D., Corcino C., et al. Consequences of Iodine Deficiency and Excess in Pregnancy and Neonatal Outcomes: A Prospective Cohort Study in Rio de Janeiro, Brazil // Thyroid: Official Journal of the American Thyroid Association. 2020. Vol. 30, No. 12. P. 1792–1801. DOI: 10.1089/thy.2019.0462.
33. Кулаев И.А. Клинико-морфологическая характеристика злокачественных новообразований щитовидной железы и их комбинации с неопухолевой патологией органа у жителей Челябинской области: автореф. дисс. ... докт. мед. наук. Челябинск, 2005. 48 с.
34. Соснина С.Ф., Окатенко П.В. Эндокринно-обменные расстройства у детей работниц предприятия атомной энергетики // Здоровоохранение Российской Федерации. 2018. Т. 62, № 4. С. 211–219. DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0044-197X-2018-62-4-211-219>.
35. Скальная М.Г. Йод: биологическая роль и значение для медицинской практики // Микроэлементы в медицине. 2018. Т. 19, № 2. С. 3–11.
36. Солнцева А.В., Якимович Н.И. Йоддефицитные состояния у детей. Минск: БГМУ, 2008. 28 с.
37. Koehler V.F., Wojunga J. Autoimmunthyreoiditis [Autoimmune thyroid disease] // Deutsche medizinische Wochenschrift. 2021. Vol. 146, No. 20. P. 1329–1336. DOI: 10.1055/a-1258-5674.
38. Паткин Е.Л., Софронов Г.А. Эколого-зависимые заболевания человека. Эпигенетические механизмы возникновения и наследования // Медицинский академический журнал. 2015. Т. 15, № 3. С. 7–23.
39. Тыртова Л.В., Паршина Н.В., Скобелева К.В. Генетические и эпигенетические аспекты ожирения и метаболического синдрома, возможности профилактики в детском возрасте // Педиатр. 2013. Т. 4, № 2. С. 3–11.
40. Kucher O.V., Vydyborets S.V. Long-term genetic and epigenetic disorders in persons exposed to ionizing radiation and their descendants (review) // Problems of Radiation Medicine and Radiobiology. 2021. Vol. 26. P. 36–56. DOI: 10.33145/2304-8336-2021-26-36-56.

Поступила: 16.06.2022 г.


Svetlana F. Sosnina – PhD of Medical Sciences, Senior Researcher of Radiation Epidemiology Laboratory, Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical and Biological Agency of Russia. **Address for correspondence:** Ozyorskoe shosse, 19, Ozyorsk, Chelyabinsk Region, 456783, Russia; E-mail: sosnina@subi.su

ORCID  <https://orcid.org/0000-0003-1553-0963>

Pavel V. Okatenko – Head of the group on computational hardware and software, Radiation Epidemiology Laboratory, Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, Ozyorsk, Russia


ORCID  <https://orcid.org/0000-0002-8260-1808>

Mikhail E. Sokolnikov – DM, Head of Epidemiology Department, Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, Ozyorsk, Russia


ORCID  <https://orcid.org/0000-0001-9492-4316>

Соснина Светлана Фаридовна – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник лаборатории радиационной эпидемиологии, Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства России.


Адрес для переписки: 456783, Россия, Челябинская область, Озёрск, Озёрское шоссе, 19; E-mail: sosnina@subi.su

ORCID  <https://orcid.org/0000-0003-1553-0963>

Окatenко Павел Викторович – руководитель группы компьютерного и программного обеспечения, лаборатория радиационной эпидемиологии, Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства России, Озёрск, Россия

ORCID  <https://orcid.org/0000-0002-8260-1808>

Сокольников Михаил Эдуардович – доктор медицинских наук, заведующий отделом эпидемиологии, Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства России, Озёрск, Россия

ORCID  <https://orcid.org/0000-0001-9492-4316>

For citation: Sosnina S.F., Okatenko P.V., Sokolnikov M.E. Consequences of parental preconceptional irradiation: Endocrine-metabolic pathology in offspring. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 4, P. 15-33. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-15-33

Для цитирования: Соснина С.Ф., Окatenко П.В., Сокольников М.Э. Последствия прекоцептивного облучения родителей: эндокринно-обменная патология у потомков // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 15-33. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-15-33

Обоснование дифференцированного подхода к обращению с биологическими отходами пациентов в подразделениях ядерной медицины

Л.А. Чипига^{1,2,3}, А.В. Водоватов^{1,4}, А.В. Петрякова^{1,5}, И.А. Звонова¹, А.А. Станжевский², Д.Н. Майстренко², Д.А. Важенина², Д.С. Сысоев²

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

² Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

³ Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

⁵ Городская больница № 40 Курортного района, Санкт-Петербург, Россия

Развитие технологий ядерной медицины в Российской Федерации способствует внедрению в практику новых диагностических радиофармпрепаратов. Начинают широко применяться тераностические пары – антитела и пептиды, меченные диагностическими и терапевтическими радионуклидами. Использование в радионуклидной диагностике радионуклидов с периодом полураспада более суток обуславливает необходимость актуализировать подходы к обращению с жидкими отходами, образующимися в результате жизнедеятельности пациента в момент нахождения его в отделении радионуклидной диагностики. Обращение с жидкими радиоактивными отходами в отделениях радионуклидной диагностики регулируется методическими указаниями МУ 2.6.1.1892-04, которые не являются по статусу нормативным документом, разрабатывались около 20 лет назад и не учитывают особенности современных методов радионуклидной диагностики и перспективные радионуклиды, которые можно сбрасывать в систему водоотведения медицинской организации без ограничений; препараты ¹³¹I, для которых специализация обязательна; и все остальные радиофармпрепараты, для которых необходимо оценивать объемы сбрасываемых активностей при проектировании. Представлена методика оценки активности радионуклидов, поступающей в систему водоотведения медицинской организации.

Ключевые слова: радионуклидная диагностика, радионуклидная терапия, ядерная медицина, радиофармпрепарат, жидкие радиоактивные отходы.

Введение

В Российской Федерации радионуклидная диагностика (РНД) является вторым после компьютерной томографии видом лучевой диагностики, показывающим за последние годы устойчивую тенденцию к росту [1]. Даже в период пандемии новой коронавирусной инфекции COVID-19 число радионуклидных диагностических ис-

следований лишь незначительно сократилось в 2020 г. по сравнению с 2019 г. и начало значительно увеличиваться в 2021 г. Результаты анализа данных, представленных в форме № 3-ДОЗ, полученных из федерального банка данных (ФБД) по индивидуальным дозам облучения граждан при проведении медицинских диагностических рентгенодиагностических процедур [2], показали, что коллективная доза от диагностических радионуклидных

Чипига Лариса Александровна

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

исследований росла как в 2020 г., так и в 2021 г. В 2021 г. число диагностических радионуклидных исследований выросло по сравнению с 2020 г. на 20%; коллективная доза – на 60%. Вклад радионуклидной диагностики в структуру коллективной дозы от медицинского облучения в 2021 г. составил 4% (до пандемии – менее 1%).

Развитие радионуклидной диагностики связано не только с ростом числа исследований, но и с внедрением в практику новых методов, технологий и радиофармацевтических лекарственных препаратов (РФЛП). В последнее время начинают внедряться в практику новые технологии, связанные с использованием антител и пептидов, меченных радионуклидами, что позволяет обеспечить прицельное воздействие на опухолевые и метастатические очаги [3]. Использование тропных к соответствующим рецепторам специфических антител и пептидов позволяет обеспечить точную доставку радионуклида в очаг и минимизировать облучение здоровых органов и тканей. Такие антитела и пептиды могут использоваться как для диагностики (с использованием радионуклидной метки ^{68}Ga , ^{64}Cu , ^{89}Zr), так и для терапии (с ^{177}Lu и ^{225}Ac), а комбинации РФЛП на их основе называются тераностическими парами. Препараты для диагностики и терапии, меченные данными радионуклидами (атезолизумаб, авелумаб, рамуцирумаб, трастузумаб и др.) [4, 5], внедряются в практику во многих странах, в том числе и в Российской Федерации. Другим перспективным и уже используемым в практике РФЛП является метайодбензилгуанидин (МИБГ), который в связке с ^{131}I применяется для лечения нейроэндокринных злокачественных новообразований у взрослых и детей (неоперабельная феохромоцитома, параганглиома, карциноидные опухоли, метастатический или рецидивирующий медуллярный рак щитовидной железы и нейробластома III или IV стадии), а меченный ^{123}I и ^{124}I – для визуализации и диагностики [6].

Использование в радионуклидной диагностике радионуклидов с периодом полураспада более суток (например, ^{89}Zr – 78,4 ч; ^{124}I – 4,18 сут) обуславливает необходимость актуализировать подходы к обращению с жидкими отходами, образующимися в результате жизнедеятельности пациента во время нахождения его в отделении радионуклидной диагностики. Согласно ОСПОРБ-99/2010¹, радиоактивные отходы (РАО), содержащие радионуклиды с пе-

риодом полураспада менее 15 сут, необходимо собирать отдельно и выдерживать на распад. В соответствии с методическими указаниями МУ 2.6.1.1892-04² наличие спецканализации для выдержки на распад радионуклидов в отходах в подразделениях радионуклидной диагностики *in vivo* не требуется вне зависимости от их периодов полураспада [7, 8]. Аналогично, согласно СанПиН 2.6.1.3288-15³, спецканализация не требуется в подразделениях позитронной эмиссионной томографии (ПЭТ), где проводятся работы с радионуклидами, период полураспада которых меньше 2 ч. Таким образом, радионуклиды, выводящиеся из организма пациента преимущественно с мочой после введения диагностического РФЛП, поступают непосредственно в систему водоотведения медицинской организации. Следует отметить, что МУ 2.6.1.1892-04 не являются по статусу нормативным документом, разрабатывались около 20 лет назад и не учитывают особенности современных методов радионуклидной диагностики и характеристики новых внедряемых в радионуклидную диагностику изотопов, а также новые критерии отнесения к радиоактивным отходам согласно постановлению Правительства от 19.10.2012 г. № 1069 и соответствующие изменения № 1 в ОСПОРБ 99/2010⁴ [9]. Таким образом, встает вопрос, как принятое обращение с жидкими отходами от пациентов в подразделениях радионуклидной диагностики соотносится с современными нормативными документами. Для ответа на данный вопрос необходимо оценить потенциальное образование активности радионуклидов в жидких отходах в подразделениях радионуклидной диагностики с учетом вводимых активностей радионуклидов пациентам и моделей биологического выведения РФЛП из организма. Ранее авторами была проведена работа по оценке активности радионуклидов в биологических отходах пациентов при проведении радионуклидной терапии [10]. Удельная активность радионуклидов в отходах будет влиять на необходимость выдержки их в подразделении до уровней, позволяющих выведение их из категории жидких радиоактивных отходов (ЖРО).

Цель исследования – оценка активностей радионуклидов в биологических отходах пациентов после введения им РФЛП в подразделениях ядерной медицины для определения путей обращения с такими отходами.

¹ СП 2.6.1.2612-10 Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010) [Sanitary rules and regulations 2.6.1.2612-10. Basic sanitary rules for radiation safety (BSRRSP-99/2010). (In Russ.)] (далее – ОСПОРБ-99/2010).

² МУ 2.6.1.1892-04 «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при проведении радионуклидной диагностики с помощью радиофармпрепаратов» [Guidelines 2.6.1.1892-04 “Hygienic requirements for radiation safety during radionuclide diagnostics using radiopharmaceuticals” (In Russ.)] (далее – МУ 2.6.1.1892-04).

³ СанПиН 2.6.1.3288-15 «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при подготовке и проведении позитронной эмиссионной томографии» от 20 июля 2015 г. № 31 [Sanitary Regulations and Standards 2.6.1.3288-15 “Hygienic requirements for radiation safety during the preparation and the conduction of positron emission tomography” (In Russ.)] (далее – СанПиН 2.6.1.3288-15).

⁴ ОСПОРБ-99/2010; Постановление Правительства Российской Федерации от 19 октября 2012 г. № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов» [Resolution of the Government of the Russian Federation No. 1069 of October 19, 2012 «On the criteria for classifying solid, liquid and gaseous waste as radioactive waste, classifying radioactive waste as special radioactive waste and as radioactive waste to be disposed of criteria for classifying radioactive waste to be disposed of» (In Russ.)] (далее – постановление Правительства от 19.10.2012 №1069).

Материалы и методы

Оценку активностей радионуклидов в жидких отходах от пациентов проводили для наиболее часто проводимых диагностических исследований: скелета с введением пациенту ^{99m}Tc-пирофосфат, всего тела с введением пациенту ¹²³I-МИБГ и ¹²³I-натрия йодида, ПЭТ-исследований всего тела с ¹⁸F-ФДГ и ⁶⁸Ga-ПСМА-617, а также для перспективных диагностических ПЭТ-исследований с ¹²⁴I-МИБГ и с моноклональными антителами, меченными ⁸⁹Zr и ⁶⁴Cu. При расчетах предполагали, что пациент находится 4 ч в отделении при исследовании скелета с ^{99m}Tc-пирофосфат, 2 ч при исследовании всего тела с ¹⁸F-ФДГ, ⁶⁸Ga-ПСМА, ¹²³I-натрия йодидом, ¹²³I-МИБГ, ¹²⁴I-МИБГ, ⁸⁹Zr-и ⁶⁴Cu-моноклональными антителами. В связи с тем, что исследования с РФЛП с радиоактивным йодом и моноклональными антителами проводятся через 24 ч или 48 ч после введения РФЛП [11–14], то для случая нахождения пациента в стационаре на период диагностического исследования в работе дополнительно провели оценку выведения радионуклидов за первые несколько суток.

Также в работе провели оценку активности ¹⁵³Sm в отходах пациентов при проведении терапевтических процедур с ¹⁵³Sm-оксабифор [15], не вошедшим в прошлую работу авторов [10]. При радионуклидной терапии с ¹⁵³Sm-оксабифор пациенту вводится активность ¹⁵³Sm ниже, чем определенная безопасной для населения при выписке пациентов согласно НРБ-99/2009⁵, поэтому процедура может проводиться в режиме дневного стационара без госпитализации пациента, в том числе и в подразделении радионуклидной диагностики. При расчетах оценивали активность ¹⁵³Sm в биологических отходах пациентов во время его пребывания в подразделении – 2 ч, дополнительно была оценена активность в отходах пациента в случае его стационарного лечения – для первых суток после введения (сутки наибольшего выведения РФЛП из организма).

Определение активности радионуклидов в отходах пациента проводили с использованием моделей биовыведения РФЛП, полученных из литературных источников [16–20]. Данные о биовыведении ⁶⁸Ga-ПСМА-617 рассчитывали на основе биовыведения ¹⁷⁷Lu-ПСМА-617 с учетом разных периодов полураспада радионуклидов ¹⁷⁷Lu и ⁶⁸Ga, считая, что выведение РФЛП на основе ПСМА аналогичны друг другу [10, 20].

Активность радионуклидов в отходах пациентов определяли с использованием формулы (1) [10, 19]:

$$\frac{A_{\text{отход}}}{A_{\text{введ}}} = \exp(-\lambda_{\text{phys}}t) \cdot \sum_{i=1}^n a_i (1 - \exp(-\lambda_{ki}t)), \quad (1)$$

где: $A_{\text{отход}}$ – активность в отходах (МБк); $A_{\text{введ}}$ – введенная активность (МБк); λ_{phys} – скорость физического распада радионуклида (сут^{-1}); λ_{ki} – константа выведения i -й фазы (сут^{-1}); a_i – доля активности для i -й фазы (отн. ед.); t – время после введения РФЛП (сут). Параметры модели выведения РФЛП представлены в таблице 1.

Параметры выведения РФЛП, используемые в расчетах по формуле 1

Таблица 1

[Table 1

Parameters of the radiopharmaceutical excretion model]

РФЛП [Radiopharmaceutical]	Период полураспада [Half-life]	Параметр [Parameter]						
		$\lambda_{\text{phys}} \text{сут}^{-1}$ [day ⁻¹]	α_1	$\lambda_{\text{bio}1} \text{сут}^{-1}$ [day ⁻¹]	α_2	$\lambda_{\text{bio}2} \text{сут}^{-1}$ [day ⁻¹]	α_3	$\lambda_{\text{bio}3} \text{сут}^{-1}$ [day ⁻¹]
^{99m} Tc-пирофосфат [16] [^{99m} Tc-pyrophosphate]	6,01 ч	2,77	0,3	33,3	0,3	8,4	0,4	0,24
¹²³ I-натрия йодид [17] [¹²³ I-NaI]	13,27 ч	1,25	1	2,1	–	–	–	–
¹²³ I-МИБГ [17] [¹²³ I-mIBG]			0,36	5,5	0,63	0,49	–	–
¹²⁴ I-МИБГ [17] [¹²⁴ I-mIBG]	4,18 сут	0,17	0,5	0,69	0,5	0,17	–	–
⁸⁹ Zr-моноклональные антитела [16] [⁸⁹ Zr-monoclonal antibodies]	3,3 сут	0,21	0,19	55,4	0,06	1,78	–	–
⁶⁴ Cu-моноклональные антитела [16] [⁶⁴ Cu-monoclonal antibodies]	12,7 ч	1,89	0,72	9,6	0,28	0,24	–	–
¹⁸ F-ФДГ [18, 19] [¹⁸ F-FDG]	109,77 мин	9,04	0,17	13,7	0,46	1,2	–	–
⁶⁸ Ga-ПСМА [20] [⁶⁸ Ga-PSMA]	67,71 мин	14,7	–	–	–	–	–	–
¹⁵³ Sm-оксабифор [15]* [¹⁵³ Sm-oxabifor]	1,94 сут	0,36	–	–	–	–	–	–

* – РФЛП для радионуклидной терапии [therapeutic radiopharmaceutical].

⁵ НРБ-99/2009. Нормы радиационной безопасности. СанПиН 2.6.1.2523-09 [Radiation safety standards 99/2009. Sanitary Regulations and Standards 2.6.1.2523-09. (In Russ.)]

На основании данных об активности радионуклидов, поступающих с отходами с систему канализации медицинской организации, оценивали годовой баланс активности подразделения ядерной медицины и поток пациентов, который допускается принимать без сбора отходов и выдержки их на распад. То есть определяли возможность снижения удельной активности радионуклидов в системе водоотведения медицинской организации за счет естественного смешивания отходов подразделения ядерной медицины с другими сточными водами до уровней ниже критериев отнесения к жидким радиоактивным отходам (ЖРО). Для оценки годового потока пациентов использовали формулу (2):

$$N = V \cdot k \cdot \frac{C_{\text{предельное}}}{A_{\text{отход}}}, \quad (2)$$

где: V – объем сточных вод в системе водоотведения, исходя из норм водопотребления медицинской организации (м^3)⁶; $k = 1$ – коэффициент перевода (г/мл); $C_{\text{предельное}}$ – предельное значение удельной активности радионуклида (критерий отнесения к ЖРО) (Бк/г)⁷; $A_{\text{отход}}$ – активность в отходах (МБк). Оценка проводилась для двух сценариев⁸:

– медицинская организация, представляющая собой отдельно стоящее *подразделение ядерной медицины*, не имеющая на своей территории дополнительных источников водопотребления и водоотведения;

– *небольшой медицинской организации* с коечным фондом 50 коек и подразделением ядерной медицины, где, помимо подразделения ядерной медицины, источниками в системе водоотведения будут кабинеты медицинского и административного персонала из других подразделений, а также аптека и столовая.

Для данных сценариев принимали, что водопотребление *подразделения ядерной медицины* составляет 290 м^3 в год ($77,5 \text{ л/сут-сотр.}$) от 15 сотрудников, работающих одну 6-часовую смену при работе 250 дней в год), а водопотребление *небольшой медицинской организации* – 8578 м^3 в год (50 коек – $10\,000 \text{ л/сут}$, 100 сотрудников – 1200 л/сутки , 2 лаборатории: 30 сотрудников – 9300 л/сут и столовая – 3000 л/сут при работе 365 дней в год).

В расчетах использовали предельные значения удельной активности из постановления Правительства от 19.10.2012 г. № 1069:

– 65 Бк/г для ^{123}I , 19 Бк/г для ^{153}Sm ;

– 0,5 Бк/г для ^{124}I и ^{89}Zr как общее предельное значение удельной активности жидких отходов с бета-излучающими радионуклидами, из-за отсутствия их в постановлении Правительства от 19.10.2012 г. № 1069.

Для $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{18}F , ^{68}Ga и ^{64}Cu предельные значения удельных активностей для отнесения их к ЖРО в постановлении Правительства от 19.10.2012 г. №1069 отсутствуют. В связи с короткими периодами полураспада при работе с данными радионуклидами допускается их сброс в систему водоотведения медицинской организации без дополнительных мероприятий.

Расчеты были выполнены с использованием программного обеспечения Excel.

Результаты и обсуждение

Стандартные вводимые активности радионуклидов и выводимые активности радионуклидов с биологическими отходами для пациента массой 75 кг за время его нахождения в медицинской организации представлены в таблице 2.

Таблица 2

Вводимые активности радионуклидов и активности радионуклидов в отходах для одного пациента с учетом распада за время его нахождения в медицинской организации

[Table 2

Administrated activity and radionuclide activity in waste from one patient considering radioactive decay during the time in the hospital]

РФЛП [Radiopharmaceutical]	Средняя вводимая активность, МБк [Average administered activity, MBq]	Время нахождения в МО [Time in the hospital]	
		Активность в отходах с учетом распада, МБк (% от введенной) [Excreted activity considering decay, MBq (% of the administered activity)]	
$^{99\text{m}}\text{Tc}$ -пирофосфат [$^{99\text{m}}\text{Tc}$ -pyrophosphate]	700	2 ч	4 ч
		240 (35%)	240 (35%)
^{18}F -ФДГ [^{18}F -FDG]	350	2 ч	
		37 (11%)	

⁶ СП 30.13330.2020 «Внутренний водопровод и канализация зданий» [Sanitary rules and regulations 30.13330.2020 «Internal water supply and sewerage of buildings». (In Russ.)]

⁷ Постановление Правительства от 19.10.2012 г. № 1069 [Resolution of the Government of the Russian Federation No. 1069 of October 19, 2012 (In Russ.)]

⁸ Приказ Министерства здравоохранения Российской Федерации от 06.06.2013 г. № 529н «Об утверждении номенклатуры медицинских организаций» [Order of Ministry of Health of the Russian Federation №529n of June 6, 2013 “On approval of the nomenclature of medical organizations”. (In Russ.)]

РФЛП [Radiopharmaceutical]	Средняя вводимая активность, МБк [Average administered activity, MBq]	Время нахождения в МО [Time in the hospital]	
		Активность в отходах с учетом распада, МБк (% от введенной) [Excreted activity considering decay, MBq (% of the administered activity)]	
⁶⁸ Ga-ПСМА [⁶⁸ Ga-PSMA]	150	2 ч	
		18 (12%)	
¹²³ I-натрия йодид [¹²³ I-NaI]	150	2 ч	24 ч
		22 (14%)	37 (25%)
¹²³ I-МИБГ [¹²³ I-mIBG]	300	2 ч	24 ч
		43 (14%)	52 (17%)
¹²⁴ I-МИБГ [¹²⁴ I-mIBG]	100	2 ч	24 ч
		16 (16%)	51 (51%)
⁸⁹ Zr-моноклональные антитела [⁸⁹ Zr-monoclonal antibodies]	70	2 ч	48 ч
		2,5 (3%)	24 (34%)
⁶⁴ Cu-моноклональные антитела [⁶⁴ Cu-monoclonal antibodies]	120	2 ч	24 ч
		4 (3%)	11 (9%)
¹⁵³ Sm-оксабифор* [¹⁵³ Sm-oxabifor]	2 800	2 ч	24 ч
		420 (15%)	950 (34%)

* – РФЛП для радионуклидной терапии [therapeutic radiopharmaceutical].

Результаты оценки активностей радионуклидов в биологических отходах пациентов показали, что за первое мочеиспускание (первые 2 ч) активность радионуклидов в отходах может сильно отличаться (от 3% у моноклональных антител до 35% у ^{99m}Tc-пирофосфат). Это демонстрирует необходимость учитывать особенности метаболизма каждого РФЛП в организме пациента при оценках активности радионуклидов в жидких отходах. Для всех рассмотренных РФЛП наибольшая выводимая активность радионуклидов была определена в 1-е сутки. Наибольшее выведение за первые часы было отмечено у ^{99m}Tc-пирофосфат: 44% РФЛП выводится за первые 2 ч и 54% – за 4 ч без учета распада (35% от введенной активности ^{99m}Tc с учетом распада). Этот РФЛП был выбран в качестве консервативной оценки активности ^{99m}Tc в отходах после радионуклидной диагностики, т.к. данные ФБД-исследования скелета с этим РФЛП являются наиболее распространенным исследованием радионуклидной диагностики в России, при этом для диагностики пациентов вводятся наибольшие активности ^{99m}Tc. Тем не менее, следует учитывать, что период полураспада ^{99m}Tc ограничен несколькими часами, так же, как и ряда других радионуклидов, применяемых в радионуклидной диагностике, и их активности значительно снизятся за время нахождения в системе канализации. Поэтому, по мнению авторов, в подразделениях радионуклидной диагностики, где перечень ограничен РФЛП, мечеными ^{99m}Tc, ⁶⁸Ga, ¹⁸F, а также ⁶⁴Cu (в связи с отсутствием значения удельной активности для отнесения к ЖРО), не требуется сбора и выдержки на радиоактивный распад жидких отходов от пациентов. К этой же категории радионуклидов можно отнести применяемые в ПЭТ-диагностике ¹¹C, ¹³N и другие

радионуклиды с периодом полураспада менее 2 ч, для которых, согласно СанПиН 2.6.1.3288-15, допускается работа без спецканализации.

На основании полученных активностей радионуклидов в отходах от пациента были проведены оценки годового баланса активности радионуклидов подразделения ядерной медицины и потока радиологических пациентов (формула 2), при которых возможен прямой сброс жидких отходов в хозяйственно-бытовую систему канализации, с учетом предельных значений удельной активности и норм водопотребления, для разных медицинских организаций (табл. 3).

Результаты, представленные в таблице 3, показали возможность снижения активности ¹²³I естественным путем в системе водоотведения изолированного подразделения ядерной медицины при ограниченном потоке пациентов. Меньшее число пациентов в год можно принять в подразделения ядерной медицины без дополнительных мер по сбору и выдержке на распад жидких отходов от пациентов с ¹²⁴I-МИБГ или ⁸⁹Zr-моноклональными антителами. Однако с учетом того, что данные радионуклиды в настоящее время находятся на этапе исследований, такого небольшого потока пациентов может хватить для проведения научно-исследовательских работ. При организации работ в подразделении ядерной медицины при наличии в медицинской организации дополнительных источников водоотведения (например, стационарные палаты с койками для нерадиологических пациентов, аптека, столовая и пр.) возможно планировать значительно больший поток пациентов для радионуклидной диагностики без проектирования спецканализации с баками для выдержки на распад ЖРО. При планировании радионуклидной терапии с ¹⁵³Sm-оксабифор необходимость сбора и выдержки

Таблица 3

Расчётное число радиологических пациентов за год и годовой баланс активности, при которых возможен прямой сброс жидких отходов в хозяйственно-бытовую канализацию для небольшой медицинской организации (МО) или для изолированного подразделения ядерной медицины (ПЯМ)

[Table 3

Calculated number of patients per year and annual activity balance that makes discharge of liquid waste into the sewerage possible for small hospital or isolated nuclear medicine department]

РФЛП [Radiopharmaceutical]	Предельное значение удельной активности, Бк/г [Limit values of specific activities, Bq/g]	Время пребывания пациента в подразделении, ч [Time in the hospital, h]	Расчётное число пациентов, чел./год [Number of patients, patient/year]		Годовой баланс активности, ГБк [Annual activity balance, GBq]	
			МО [hospital]	ПЯМ [NM department]	МО [hospital]	ПЯМ [NM department]
¹²³ I-натрия йодид [¹²³ I-NaI]	65	2	26 000	880	3 900	132
		24	15 000	–	2 250	–
¹²³ I-МИБГ [¹²³ I-mIBG]	65	2	13 000	440	3 900	132
		24	10 700	–	3 230	–
¹²⁴ I-МИБГ [¹²⁴ I-mIBG]	0,5	2	270	9	27	0,9
		24	80	–	8	–
⁸⁹ Zr-моноклональные антитела [⁸⁹ Zr-monoclonal antibodies]	0,5	2	1770	60	124	4
		24	230	–	16	–
¹⁵³ Sm-оксабифор* [¹⁵³ Sm-oxabifor]	19	2	390	13	1 100	36
		24	170	–	470	–

* – РФЛП для радионуклидной терапии [therapeutic radiopharmaceutical].

на распад жидких отходов пациентов будет определяться номенклатурой медицинской организации, планируемым объемом системы водоотведения, медико-техническим заданием на проектирование и планируемым потоком пациентов. Обоснование снижения активности радионуклидов в отходах естественным путем в системе водоотведения медицинской организации до уровней предельных значений должно выполняться на этапе проектирования.

Альтернативой спецканализации для небольшого потока пациентов или при невозможности конструктивно разместить систему спецканализации в медицинской организации является использование специализированных биотуалетов с защищенными сборниками для биологических жидкостей, относящихся по уровню удельной активности к ЖРО [21]. В зависимости от объема контейнера-сборника такой биотуалет может быть использован для всего потока пациентов за день либо для отдельных пациентов. В зависимости от конструкции биотуалета после наполнения ЖРО выдерживаются на распад в специальном защищенном контейнере-сборнике биотуалета или контейнеры-сборники удаляются из биотуалета и выдерживаются на распад в помещении хранения твердых РАО.

На основании проведенных расчетов по выведению радионуклидов в биологические отходы пациентов в отделениях радионуклидной диагностики и терапии [10] была предложена градация РФЛП по возможности сброса жидких отходов от пациентов в хозяйственно-бытовую канализацию.

Как следует из таблицы 4, для ряда диагностических РФЛП при превышении годового числа пациентов, приведенного в таблице 3, могут потребоваться проектные решения по сбору и выдержке биологических жидкостей на распад (например, организация спецканализации или использование специализированных биотуалетов). Это обстоятельство требует приведения действующих МУ 2.6.1.1892-04 в соответствие с требованиями вышестоящих документов.

Результаты, представленные в таблицах 3 и 4, целесообразно использовать при проектировании подразделений ядерной медицины, учитывая все планируемые к применению радионуклиды в соответствии с критериями, установленными в действующих нормативно-методических документах (Постановление Правительства от 19.10.2012 г. № 1069, ОСПОРБ-99/2010). Стоит отметить, что неотъемлемым элементом представленного подхода является радиационный контроль сточных вод, методики которых в настоящее время отсутствуют. Следующие работы авторов будут посвящены разработке таких методик.

Заключение

Проведенные в работе оценки показали, что доля радионуклидов в отходах пациента будет зависеть от фармакокинетических свойств РФЛП. При проектировании подразделений ядерной медицины и определении мероприятий по обращению с жидкими отходами пациентов необходимо учитывать специфическую для каждого РФЛП активность радионуклида в отходах.

Таблица 4

Градации РФЛП по возможности освобождения медицинских организаций от сбора и выдержки на распад жидких отходов [Table 4

Gradation of radiopharmaceuticals by the possibility of exemption from collecting and keeping for decay of liquid waste]

Показатели	Диагностические РФЛП [Diagnostic Radiopharmaceuticals]	Терапевтические РФЛП [Therapeutic Radiopharmaceuticals]**
РФЛП, не требующие сбора и выдержки на распад жидких отходов [Radiopharmaceuticals, which do not require collecting and keeping for decay of liquid waste]	^{99m} Tc-пирофосфат [^{99m} Tc-pyrophosphate], ¹⁸ F-ФДГ [¹⁸ F-FDG], ⁶⁸ Ga-ПСМА [⁶⁸ Ga-PSMA], ⁶⁴ Cu-моноклональные антитела [⁶⁴ Cu-monoclonal antibodies]	⁸⁹ Sr-дихлорид [⁸⁹ Sr-dichloride] (при дневном стационаре [in a day hospital]***), ²²³ Ra-дихлорид [²²³ Ra-dichloride] (при дневном стационаре [in a day hospital]***)
РФЛП, требующие сбора и выдержки на распад жидких отходов при большом потоке пациентов* [Radiopharmaceuticals, which require collecting and keeping for decay of liquid waste where large patients flow]	¹²³ I-натрия йодид [¹²³ I-Nal], ¹²³ I-МИБГ [¹²³ I-mIBG], ¹²⁴ I-МИБГ [¹²⁴ I-mIBG], ⁸⁹ Zr-моноклональные антитела [⁸⁹ Zr-monoclonal antibodies]	¹⁵³ Sm-оксабифор [¹⁵³ Sm-oxabifor], ⁸⁹ Sr-дихлорид [⁸⁹ Sr-dichloride], ²²³ Ra-дихлорид [²²³ Ra-dichloride], ¹⁷⁷ Lu-ПСМА [¹⁷⁷ Lu-PSMA], ²²⁵ Ac-ПСМА [²²⁵ Ac-PSMA]
РФЛП, требующие сбора и выдержки на распад жидких отходов вне зависимости от потока пациентов [Radiopharmaceuticals, which require collecting and keeping for decay of liquid waste regardless of the patients flow]	–	¹³¹ I-МИБГ [¹³¹ I-mIBG]

* – определяется номенклатурой медицинской организации согласно Приказу Минздрава РФ от 06.06.2013 г. № 529н «Об утверждении номенклатуры медицинских организаций», медико-техническим заданием на проектирование и планируемым потоком пациентов при проектировании [is determined by Order of Ministry of Health of the Russian Federation №529n of June 6, 2013 “On approval of the nomenclature of medical organizations” (In Russ.)];

** – расчеты приведены в работе [10] [calculations are given in study [10]];

*** – радионуклидная терапия в условиях дневного стационара подразумевает, что пациент находится в медицинской организации не более 4 ч [patient stay in a day hospital less than 4 hours during radionuclide therapy].

Системы водоотведения даже небольшой медицинской организации может быть достаточно для снижения уровня удельной активности до предельных значений в отходах от 440 пациентов в год после радионуклидной диагностики с ¹²³I-МИБГ или 880 пациентов в год с ¹²³I-натрия йодид. Активность других радионуклидов, применяемых для диагностики, с периодом полураспада, который ограничивается несколькими часами, будет быстро снижаться за счет радиоактивного распада и существенно снизится до поступления этих отходов на станцию водоочистки и дальше в открытые водоемы.

Для ряда диагностических РФЛП (меченных ¹²³I, ¹²⁴I и ⁸⁹Zr) количество пациентов за год, которое можно обследовать без спецканализации, ограничено. При разработке проектной документации подразделений ядерной медицины для работы с такими радионуклидами возможно предусматривать спецканализацию или набор биотуалетов, что позволит соблюдать все требования радиационной безопасности даже при увеличении потока пациентов.

Ограничения работы

Представленные расчеты основаны на моделях био-выведения РФЛП из организма человека из литературных данных. Рассмотренный подход не учитывал импульсный характер поступления отходов от пациентов в канализацию. Считалось, что снижение удельной активности радионуклидов происходит за счет смешивания отходов с нерадиоактивными водами в системе водоотведения медицинской канализации. Расчеты проводились для каждого РФЛП отдельно и не учитывали единовременное

проведение процедур с различными РФЛП в медицинской организации.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Чипига Л.А. – научное руководство исследованием, определение цели, разработка дизайна исследования, формулировка научных гипотез, обработка и анализ полученных результатов, написание текста.

Водоватов А.В. – разработка дизайна исследования, анализ и интерпретация результатов, обсуждение результатов исследования.

Петрякова А.В. – поиск и анализ литературы, проведение расчетов, описание материалов и методов, перевод.

Звонова И.А. – анализ и интерпретация результатов.

Станжевский А.А. – поиск и анализ литературы, описание текущего состояния ядерной медицины в стране и проблематики.

Майстренко Д.Н. – анализ результатов.

Важенина Д.А. – анализ результатов.

Сысоев Д.С. – анализ результатов.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена в рамках отраслевой программы Роспотребнадзора «Разработка и научное обоснование комплекса мер по обеспечению радиационной защиты в ядерной медицине».

Литература

1. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2015-2021 гг.: Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации. – М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2016-2022 гг.
2. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К. и др. Радиационно-гигиеническая паспортизация и ЕСКИД – информационная основа принятия управленческих решений по обеспечению радиационной безопасности населения Российской Федерации. Сообщение 1. Основные достижения и задачи по совершенствованию // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, №3. С. 7-17.
3. Dewulf J., Adhikari K., Vangestel C. et al. Development of Antibody Immuno-PET/SPECT Radiopharmaceuticals for Imaging of Oncological Disorders—An Update // *Cancers*. 2020. Vol. 12, No 7. 1868 p. <https://doi.org/10.3390/cancers12071868>.
4. Чипига Л.А., Петрова А.Е., Мосунов А.А. и др. Предварительная оценка доз облучения пациентов при проведении диагностических радионуклидных исследований с моноклональными антителами, меченными ⁸⁹Zr // *Формулы Фармации*. 2021. Т. 3, № 3. С. 48-61. doi: 10.17816/phf81118.
5. Жуковский М.В., Онищенко А.Д. Радиофармпрепараты на основе моноклональных антител для ПЭТ и ОФЭКТ-визуализации: биокинетические модели и дозиметрические оценки // *Траектория исследований – человек, природа, технологии*. 2022. Т. 2, № 2. С. 80-155. DOI: 10.56564/27825264_2022_2_80.
6. Gear J., Chiesa C., Lassmann M. et al. EANM Dosimetry Committee series on standard operational procedures for internal dosimetry for ¹³¹I-mIBG treatment of neuroendocrine tumours // *EJNMMI Physics*. 2020. Vol. 7, № 1. P. 15. <https://doi.org/10.1186/s40658-020-0282-7>
7. Наркевич Б.Я. Анализ проблем обеспечения радиационной безопасности в ядерной медицине // *Онкологический журнал: лучевая диагностика, лучевая терапия*. 2018. Т. 1, № 1. С. 89-85.
8. Наркевич Б.Я. Радиационная безопасность в ядерной медицине: сообщение I. Актуальные проблемы // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2021. Т. 66, № 1. С. 29-36. <https://doi.org/10.12737/1024-6177-2021-66-1-29-36>.
9. Романович И.К., Барковский А.Н. О новых критериях отнесения отходов к радиоактивным и об изменении, внесенных в ОСПОРБ-99/2010 и СПОРО-2002 // *Радиационная гигиена*. 2014. Т. 7, № 1. С. 30-35.
10. Чипига Л.А., Водоватов А.В., Звонова И.А. и др. Обращение с биологическими отходами пациентов после проведения радионуклидной терапии // *Радиационная гигиена*. 2022. Т. 15, № 2. P. 19-30. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-2-19-30>.
11. Song H., Mosci C., Akatsu H. et al. Diagnostic ¹²³I Whole Body Scan Prior to Ablation of Thyroid Remnant in Patients with Papillary Thyroid Cancer // *Clinical Nuclear Medicine*. 2018. Vol. 43, No.10. P. 705-709. <https://doi.org/10.1097/RLU.0000000000002246>.
12. Ott R.J., Tait D., Flower M.A. et al. Treatment planning for ¹³¹I-mIBG radiotherapy of neural crest tumours using ¹²⁴I-mIBG positron emission tomography // *The British journal of radiology*. 1992. Vol. 65, No. 777. P. 787-791. <https://doi.org/10.1259/0007-1285-65-777-787>.
13. Dijkers E.C., Oude Munnink T.H., Kosterink J.G. et al. Biodistribution of ⁸⁹Zr-trastuzumab and PET imaging of HER2-positive lesions in patients with metastatic breast cancer // *Clinical Pharmacology and Therapeutics*. 2010. Vol. 87, No 5. P. 586-92. <https://doi.org/10.1038/clpt.2010.12>.
14. Anderson C.J., Ferdani R. Copper-64 radiopharmaceuticals for PET imaging of cancer: advances in preclinical and clinical research // *Cancer Biotherapy and Radiopharmaceuticals*. 2009. Vol. 24, No. 4. P. 379-93. <https://doi.org/10.1089/cbr.2009.0674>.
15. Parlak Y., Gumuser G., Sayit E. Samarium-153 therapy for prostate cancer: the evaluation of urine activity, staff exposure and dose rate from patients // *Radiation Protection Dosimetry*. 2015. Vol. 163, No. 4. P. 468-472. doi: 10.1093/rdp/ncu237.
16. ICRP. Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals: A Compendium of Current Information Related to Frequently Used Substances. ICRP Publication 128. Ann. ICRP. 2015, 44(2S).
17. ICRP. Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals. ICRP Publication 53. Ann. ICRP. 1988; 18 (1-4).
18. Dowd M.T., Chen C.T., Wendel M.J. et al. Radiation dose to the bladder wall from 2-[¹⁸F] fluoro-2-deoxy-D-glucose in adult humans // *Journal of Nuclear Medicine*. 1991. Т. 32, №. 4. С. 707-712.
19. Chen C.T., Harper P.V., Lathrop K.A. A simple dynamic model for calculating radiation absorbed dose to the bladder wall // *4th International Radiopharmaceutical Dosimetry Symposium*. 1985. P. 5-8.
20. Kurth J., Krause B.J., Schwarzenböck S.M. et al. External radiation exposure, excretion, and effective half-life in ¹⁷⁷Lu-PSMA-targeted therapies // *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging research*. 2018. Vol. 8, No 1. P. 1-11. <https://doi.org/10.1186/s13550-018-0386-4>.
21. Shielded WC for disposal of organic radioactive waste. URL: <https://www.comecer.com/wdl-series-shielded-wc-disposal-organic-radioactive-waste/> (Дата обращения: 20.10.2022).

Поступила: 21.10.2022 г.

Чипига Лариса Александровна – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; научный сотрудник Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова Министерства здравоохранения Российской Федерации; доцент кафедры ядерной медицины и радиационных технологий Национального медицинского исследовательского центра им. В.А. Алмазова Министерства здравоохранения Российской Федерации. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: larisa.chipiga@gmail.com

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

Петрякова Анастасия Валерьевна – исполняющая обязанности младшего научного сотрудника 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; инженер по радиационной безопасности Городской больницы № 40, Санкт-Петербург, Россия

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

Станжевский Андрей Алексеевич – доктор медицинских наук, заместитель директора по научной работе Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

Майстренко Дмитрий Николаевич – доктор медицинских наук, директор Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

Важенина Дарья Андреевна – доктор медицинских наук, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории тераностики онкологических заболеваний Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова Министерства здравоохранения Российской Федерации, доцент ВАК, Санкт-Петербург, Россия

Сысоев Дмитрий Сергеевич – кандидат физико-математических наук, руководитель группы разработки и производства приборов для ядерной медицины Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Чипига Л.А., Водоватов А.В., Петрякова А.В., Звонова И.А., Станжевский А.А., Майстренко Д.Н., Важенина Д.А., Сысоев Д.С. Обоснование дифференцированного подхода к обращению с биологическими отходами пациентов в подразделениях ядерной медицины // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 34-44. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-34-44

Justification of differential approach to management of patient biological waste in nuclear medicine departments

Larisa A. Chipiga^{1,2,3}, Aleksandr V. Vodovатов^{1,4}, Anastasia V. Petryakova^{1,5}, Irina A. Zvonova¹, Andrey A. Stanzhevsky², Dmitriy N. Maistrenko², Daria A. Vazhenina², Dmitriy S. Sysoev²

¹ Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

² A. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia

³ Almazov National Medical Research Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia

⁴ Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

⁵ The City Hospital No 40 of the Kurortny District, Saint-Petersburg, Russia

The development of nuclear medicine technologies in the Russian Federation contributes to the implementation of new diagnostic radiopharmaceuticals in practice. Theranostic pairs such as antibodies and peptides labeled diagnostic and therapeutic radionuclides are beginning to be commonly used. The use of radionuclides with a longer half-life in radionuclide diagnostics causes the updating of the approaches to management of liquid waste generated as a result of the patient's metabolic activity during the time spent in the radionuclide diagnostics department. Management of liquid radioactive waste in radionuclide diagnostic department is regulated by guidelines MU 2.6.1.1892-04. The guidelines are not the regulatory document.

Larisa A. Chipiga

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

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

These were developed about 20 years ago, and do not considering features of the modern methods in radionuclide diagnostics, promising radionuclides with half-life of several days, and new criteria for classifying as a radionuclide waste in accordance with Resolution of the Government of the Russian Federation No. 1069. The aim of the study was the assessment of the radionuclide activities excreted from patient after radiopharmaceutical injection in radionuclide diagnostics departments in order to define the waste management pathways. In a result, all diagnostic and therapeutic radiopharmaceuticals were divided into the categories: radiopharmaceuticals with ultrashort-lived radionuclides, which can be discharged into the hospital sewerage without any restrictions; radiopharmaceuticals with ^{131}I , which need the special sewerage; the other radiopharmaceuticals, which need to assess the volume of discharged radionuclide activities during the projection of the nuclear medicine department. The method of assessment of the radionuclide activities entering the hospital sewerage is presented.

Key words: *radionuclide diagnostics, radionuclide therapy, radiopharmaceutical, liquid radioactive waste.*

Information about authors' personal contribution to the work on the article

Chipiga L.A. – scientific management of the study, determination of the aim of the study, development of the study design, formulation of the scientific conjectures, processing, and analysis of results, writing the text of the article.

Vodovатов A.V. – development of the study design, analysis and interpretation of the results, discussion of the results.

Petryakova A.V. – search and analysis of literature, calculations, description of materials and methods, translation.

Zvonova I.A. – analysis and interpretation of the results.

Stanzhevsky A.A. – search and analysis of literature, description of current state of nuclear medicine in Russia and issue for the study.

Maistrenko D.N. – analysis of the results.

Vazhenina D.A. – analysis of the results.

Sysoev D.S. – analysis of the results.

Conflict of interest

The authors have no conflicts of interest to disclose.

Information about the source of funding

The work was performed as a part of the program of Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being “Development and scientific justification of a set of measures to ensure radiation protection in nuclear medicine”.

References

1. Results of radiation-hygienic passportization in regions of the Russian Federation in 2015-2021. (Radiation-Hygienic Passport of the Russian Federation). Moscow: Rospotrebnadzor; 2016-2022. (In Russian).
2. Onishchenko GG, Popova AYu, Romanovich IK, Barkovsky AN, Kormanovskaya TA, Shevkun IG. Radiation-hygienic passportization and USIDC-information basis for management decision making for radiation safety of the population of the Russian Federation. Report 1. Main achievements and challenges to improve. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(3): 7-17. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-3-7-17>.
3. Dewulf J, Adhikari K, Vangestel C, Wyngaert TVD, Elvas F. Development of Antibody Immuno-PET/SPECT Radiopharmaceuticals for Imaging of Oncological Disorders – An Update. *Cancers*. 2020;12(7): 868. <https://doi.org/10.3390/cancers12071868>.
4. Chipiga LA, Petrova AE, Mosunov AA, et al. Preliminary evaluation of patient radiation doses during radionuclide diagnostic with monoclonal antibodies labeled with ^{89}Zr . *Pharmacy Formulas*. 2021;3(3): 48-61. doi: 10.17816/phf81118.
5. Zhukovsky MV, Onishchenko AD. Radiopharmaceuticals Based on Monoclonal Antibodies for PET and SPECT Imaging: Biokinetic Models and Dosimetric Evaluations. *Traektoriya issledovaniy – chelovek, priroda, tekhnologii = Research trajectory – man, nature, technology*. 2022;2(2): 80-155. DOI: 10.56564/27825264_2022_2_80.
6. Gear J, Chiesa C, Lassmann M, et al. EANM Dosimetry Committee series on standard operational procedures for internal dosimetry for ^{131}I -mIBG treatment of neuroendocrine tumours. *EJNMMI Physics*. 2020;7(1): 15. <https://doi.org/10.1186/s40658-020-0282-7>.
7. Narkevich BYa. Analysis of Radiation Safety Problems in Nuclear Medicine. *Onkologicheskij zhurnal: luchelevaja diagnostika, luchelevaja terapiya = Journal of oncology: diagnostic radiology and radiotherapy*. 2018;1(1): 89-85. (In Russian).
8. Narkevich BYa. Radiation Safety in Nuclear Medicine: Report I. Topical Problems. *Meditinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2021;66(1): 29-36. (In Russian) <https://doi.org/10.12737/1024-6177-2021-66-1-29-36>.
9. Romanovich IK, Barkovsky AN. On A New Criteria of the Referring Waste to Radioactive Categories and on the Amendments Introduced in BSRRSP-99/2010 and SRRWT-2002. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(1): 30-35. (In Russian).
10. Chipiga LA, Vodovатов AV, Zvonova IA, Stanzhevsky AA, Petryakova AV, Anokina EE, et al. Management of biological waste of patients after radionuclide therapy. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(12): 19-30. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-2-19-30>.
11. Song H, Mosci C, Akatsu H, et al. Diagnostic ^{123}I Whole Body Scan Prior to Ablation of Thyroid Remnant in Patients with Papillary Thyroid Cancer. *Clinical Nuclear Medicine*. 2018;43(10): 705-709. <https://doi.org/10.1097/RLU.0000000000002246>.
12. Ott RJ, Tait D, Flower MA, et al. Treatment planning for ^{131}I -mIBG radiotherapy of neural crest tumours using ^{124}I -mIBG positron emission tomography. *The British journal of radiology*. 1992;65(777): 787-791. <https://doi.org/10.1259/0007-1285-65-777-787>.
13. Dijkers EC, Oude Munnink TH, Kosterink JG, et al. Biodistribution of ^{89}Zr -trastuzumab and PET imaging of HER2-positive lesions in patients with metastatic breast cancer. *Clinical Pharmacology and Therapeutics*. 2010;87(5): 586-92. <https://doi.org/10.1038/clpt.2010.12>.
14. Anderson CJ, Ferdani R. Copper-64 radiopharmaceuticals for PET imaging of cancer: advances in pre-clinical and clinical research. *Cancer Biotherapy and*

- Radiopharmaceuticals*. 2009;24(4): 379-93. <https://doi.org/10.1089/cbr.2009.0674>.
15. Parlak Y, Gumuser G, Sayit E. Samarium-153 therapy for prostate cancer: the evaluation of urine activity, staff exposure and dose rate from patients. *Radiation Protection Dosimetry*. 2015;163(4): 468-472. doi: 10.1093/rpd/ncu237.
 16. ICRP. Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals: A Compendium of Current Information Related to Frequently Used Substances. ICRP Publication 128. Ann. ICRP. 2015, 44(2S).
 17. ICRP. Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals. ICRP Publication 53. Ann. ICRP. 1988; 18 (1-4).
 18. Dowd MT, Chen CT, Wendel MJ, et al. Radiation dose to the bladder wall from 2-[18F] fluoro-2-deoxy-D-glucose in adult humans. *Journal of Nuclear Medicine*. 1991;32(4): 707-712.
 19. Chen CT, Harper PV, Lathrop KA. A simple dynamic model for calculating radiation absorbed dose to the bladder wall. *4th International Radiopharmaceutical Dosimetry Symposium*. 1985: 5-8.
 20. Kurth J, Krause BJ, Schwarzenböck SM, Stegger L, Schäfers M, Rahbar K. External radiation exposure, excretion, and effective half-life in 177Lu-PSMA-targeted therapies. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging research*. 2018;8(1): 1-11. <https://doi.org/10.1186/s13550-018-0386-4>.
 21. Shielded WC for disposal of organic radioactive waste. URL: <https://www.comecer.com/wdl-series-shielded-wc-disposal-organic-radioactive-waste/> (Accessed: 20.10.2022)

Received: October 21, 2022

For correspondence: Larisa A. Chipiga – Ph.D., research fellow, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being; research fellow, A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation; docent, Almazov National Medical Research Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation (Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: larisa.chipiga@gmail.com)

Aleksandr V. Vodovatov – Ph.D., Head of Laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being; docent, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

Anastasia V. Petryakova – acting junior researcher, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being; radiation safety engineer, Saint-Petersburg City Hospital No. 40, Saint-Petersburg, Russia

Irina A. Zvonova – Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher of Protection Laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

Andrey A. Stanzhevsky – M.D., Deputy Director for Research, A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia

Dmitriy N. Maistrenko – M.D., Head of A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia

Daria A. Vazhenina – M.D., Chief Researcher, Head of Laboratory of Theragnostic and Oncology, A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia

Dmitriy S. Sysoev – Ph.D., Head of the group for the development and production of equipment for nuclear medicine, A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia

For citation: Chipiga L.A., Vodovatov A.V., Petryakova A.V., Zvonova I.A., Stanzhevsky A.A., Maistrenko D.N., Vazhenina D.A., Sysoev D.S. Justification of differential approach to management of patient biological waste in nuclear medicine departments. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 4. P. 34-44. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-34-44

Динамика содержания ^{137}Cs в сельскохозяйственной продукции Брянской области после аварии на ЧАЭС: зерно, картофель и овощи

С.В. Фесенко¹, П.В. Прудников², Е.С. Емлютина¹, И.Э. Епифанова¹,
О.А. Шубина¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

²Брянский центр «Агрехимрадиология», п. Мичуринский, Брянская область, Россия

Целью исследования являлся анализ закономерностей изменения содержания ^{137}Cs в зерне, картофеле и овощах в районах, подвергшихся загрязнению после аварии на Чернобыльской АЭС. Приведены данные, характеризующие проведение защитных мероприятий в юго-западных районах Брянской области. Описана система радиологического мониторинга загрязнения продукции растениеводства и представлены соответствующие данные. Динамика изменения содержания ^{137}Cs как в зерне, так и в картофеле и овощах носила ярко выраженный неоднородный характер. Снижение концентрации ^{137}Cs в продукции растениеводства определялось динамикой проведения агрохимических защитных мероприятий в районах, подвергшихся загрязнению, сорбцией ^{137}Cs в почве и радиоактивным распадом. Показано, что эффективные периоды полуснижения содержания ^{137}Cs в отмеченных видах продукции в период интенсивного проведения защитных и реабилитационных мероприятий (1987–1990 гг.) варьировали в пределах от 0,7 до 1,3 лет. В последующем (1991–2011 гг.) в большинстве районов снижение загрязнения продукции замедлилось, а в некоторых районах, где мероприятия проводились особенно интенсивно, отмечалось определенное увеличение содержания ^{137}Cs в сельскохозяйственной продукции. Эффективные периоды полуснижения в этот период составляли от 10,5 до 29 лет в зависимости от особенностей применения мероприятий, вида растений и характеристик почв. Характер изменения содержания ^{137}Cs в зерне различных районов в период с 2011 до 2021 г. также отличался в зависимости от особенностей проведения мероприятий в этих районах в предыдущие периоды.

Ключевые слова: Чернобыльская АЭС, сельскохозяйственная продукция, юго-западные районы Брянской области, мониторинг в сельском хозяйстве, ^{137}Cs .

Введение

Аварии на ЧАЭС часто рассматривают как «сельскую аварию» [1]. Так, загрязнение сельскохозяйственных угодий и вызванное этим производство продукции с повышенным содержанием радиоактивных веществ было и остается одним из основных источников облучения населения, проживающего на загрязненных территориях [2–5].

Во-первых, на всех этапах поставарийного периода вклад внутреннего облучения (т.е. облучения, связанного с потреблением загрязненных продуктов питания) составляет значительную долю в структуре суммарных дозовых нагрузок на человека (достигая в отдельных случаях до 70% и более) [4–7].

Во-вторых, радиоактивное загрязнение сельскохозяйственной сферы охватило очень большие площади. Только в границах зоны с плотностью загрязнения ^{137}Cs свыше 1 Ки/км² (37 кБк/м²) эта территория составила 150 тыс. км² [8,9]. В загрязненных районах Брянской,

Орловской и Тульской областей производилось от 40 до 70% зерна, до 60% картофеля от общего производства в этих областях [4, 8].

В-третьих, среди населения, подвергающегося дополнительному облучению вследствие аварийного загрязнения окружающей среды, преобладают сельские жители. Наконец, в-четвертых, при одинаковой плотности выпадений дозы облучения селян, как правило, выше, чем населения, проживающего в городах [5, 10, 11].

Для решения задач, связанных со смягчением последствий аварии в агропромышленном комплексе (АПК) загрязненных регионов, в России была создана широко-масштабная система радиационного контроля и мониторинга сельскохозяйственных объектов, проведено её техническое оснащение. За период после аварии было проведено более 250 тыс. измерений содержания радионуклидов в продукции растениеводства (включая корма для животных) и более 1 млн измерений содержания радионуклидов в продукции животноводства. Проведение

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

радиационного контроля обеспечило выявление сельскохозяйственной продукции, не соответствующей временным допустимым уровням (ВДУ), что позволило принять оперативные меры по переработке этой продукции, а также обосновать объемы внедрения защитных и реабилитационных мероприятий в хозяйствах и оценить реальный эффект от их внедрения. Кроме того, использование этих данных позволяет оценить динамику изменения содержания радионуклидов в продукции сельского хозяйства, что имеет важное значение для оценки возможности перехода к условиям нормальной жизнедеятельности. К настоящему времени данные мониторинга сельскохозяйственной продукции на загрязненных территориях охватывают 35-летний период. В то же время объемы и периоды проведения мониторинга различных видов продукции существенно отличались. Так, период мониторинга содержания ^{137}Cs в овощах и картофеле, проводимый организациями Министерства сельского хозяйства России, проводился до 2007 г., тогда как измерения содержания ^{137}Cs в зерне и кормовых культурах выполнялись с 1986 по 2021 г.

Существенно отличались и объемы проведения мониторинга в отдельных районах Брянской области. Так, до настоящего времени наблюдения проводились в хозяйствах 6 наиболее загрязненных районов: Гордеевского, Злынковского, Климовского, Клинцовского, Красногорского и Новозыбковского, тогда как в хозяйствах и населенных пунктах Стародубского района отбор проб выполнялся в ограниченных масштабах. В настоящее время финансирование системы мониторинга в районах, пострадавших после аварии на ЧАЭС, практически прекращено.

Анализ динамики содержания ^{137}Cs в сельскохозяйственной продукции для первого периода после аварии, охватывающий 1986–1994 гг., представлен в публикациях [2–4], однако данные последующего периода обобщались недостаточно, что ограничивает использование результатов мониторинга, проводимого организациями Минсельхоза России, для решения задач, связанных с обоснованием перехода населения, проживающего на загрязненных территориях, к

условиям нормальной жизнедеятельности. Важное значение эти данные имеют и для оценки последствий других потенциально возможных аварий и планирования аварийного реагирования.

Цель исследования – анализ закономерностей изменения содержания ^{137}Cs в зерне, картофеле и овощах в некоторых районах Брянской области, подвергшихся загрязнению после аварии на Чернобыльской АЭС. Предполагается, что данные о концентрации этого радионуклида в кормовых растениях, молоке и мясе сельскохозяйственных животных будут представлены в последующих публикациях.

Задачи исследования

При проведении исследований решались следующие задачи:

1. Обобщение данных по концентрациям ^{137}Cs в зерне, картофеле и овощах, полученных организациями Минсельхоза России с 1986 до 2021 г.
2. Оценка периодов полуснижения содержания ^{137}Cs в вышеперечисленной продукции в различные временные интервалы после аварии на Чернобыльской АЭС.
3. Оценка роли факторов, определяющих динамику снижения содержания ^{137}Cs в зерне, картофеле и овощах после аварии.

Материалы и методы

Для анализа параметров снижения содержания ^{137}Cs в продукции растениеводства использовались данные мониторинга, проводимого центром «Агрохимрадиология «Брянский» и областной ветеринарной радиологической лабораторией в 7 юго-западных районах Брянской области: Гордеевском, Злынковском, Климовском, Клинцовском, Красногорском, Новозыбковском и Стародубском [4, 12, 13]. В рамках этих исследований отбирались пробы основных видов продукции растениеводства, включая зерно, картофель, овощи, производимые в хозяйствах, находящихся на загрязнённой территории. Количество данных, использованных для оценки закономерностей изменения концентраций ^{137}Cs с 1986 по 2021 гг. в зерне, картофеле и овощах, приведено в таблице 1 [12–13].

Таблица 1

Количество данных, использованных для оценок

[Table 1

Quantity of data used for evaluations]

Районы [Districts]	Плотность загрязнения в 1986 г., кБк/м ² [Contamination density of soil in 1986, kBq/m ²]	Площадь, км ² [Area, km ²]	Зерно [Grain]	Картофель [Potato]	Овощи [Vegetables]	Всего [Total]
Гордеевский [Gordeyevsky]	562	327	3381	827	283	4491
Злынковский [Zlunkovsky]	459	253	1801	387	170	2358
Климовский [Klimovsky]	196	779	2855	2717	2217	7789
Клинцовский [Klintsovsky]	263	444	7107	528	497	8132
Красногорский [Krasnogorsky]	574	424	3769	1301	351	5421
Новозыбковский [Novozybkovsky]	772	391	9717	2237	1203	13157

Районы [Districts]	Плотность загрязнения в 1986 г., кБк/м ² [Contamination density of soil in 1986, kBq/m ²]	Площадь, км ² [Area, km ²]	Зерно [Grain]	Картофель [Potato]	Овощи [Vegetables]	Всего [Total]
Стародубский [Starodubsky]	45	918	1968	1122	454	3544
Всего [Total]	327	3536	30598	9119	5175	44892

Данные, представленные в таблице 1, отражают результаты систематического отбора проб, проведенного в 70 хозяйствах с плотностью загрязнения сельскохозяйственных угодий от 29 до 1394 кБк м⁻².

Наиболее высокие плотности загрязнения ¹³⁷Cs пашни (свыше 500 кБк/м²) отмечены в Новозыбковском, Красногорском и Гордеевском районах Брянской области. Злынковский район (459 кБк/м²) в этом ряду занимает промежуточное положение, а минимальные, хотя и достаточно существенные, уровни загрязнения ¹³⁷Cs пахотных угодий (150–300 кБк/м²) отмечены в Стародубском, Клинцовском и Климовском районах. Объем проведения мониторинга в этих районах в целом соответствовал как плотности загрязнения пашни, так и объемам производимой продукции.

Данные радиологического мониторинга содержания ¹³⁷Cs в сельскохозяйственной продукции включали следующую информацию: дата отбора, объем обследуемой продукции в тоннах, число отобранных проб, объемы и процент проб с превышением нормативов, среднее, минимальное и максимальное значение, рассчитанные для каждого хозяйства и вида продукции. Полученные данные обобщались на уровне как районов, так и отдельных хозяйств, что позволяет получить оценки при различной агрегации данных.

Динамика проведения мониторинга продукции растениеводства показана на рисунке 1. Видно, что наибольшие объемы измерений отмечались в 1986–1993 гг., то есть в период, когда применение защитных мероприятий в сельском хозяйстве было максимальным.

Значимыми были объемы проведения измерений в период внедрения федеральных целевых программ по смягчению последствий Чернобыльской аварии и в 2000–2010 гг. Следует отметить, что длительность проведения мониторинга отдельных видов продукции отличались. Так, отбор проб картофеля и овощей практически прекратился в 2011 г., поскольку средние уровни загрязнения этих видов продукции были в 10 и более раз меньше соответствующих нормативов¹, а превышение нормативов отмечалось только в единичных случаях. Мониторинг содержания ¹³⁷Cs в зерне проводился до 2021 г. и был также остановлен из-за низких уровней содержания этого радионуклида в зерне.

Параметры

Для анализа динамики снижения концентрации ¹³⁷Cs в сельскохозяйственной продукции ($Q(t)$) использовался подход, основанный на оценке эффективных периодов

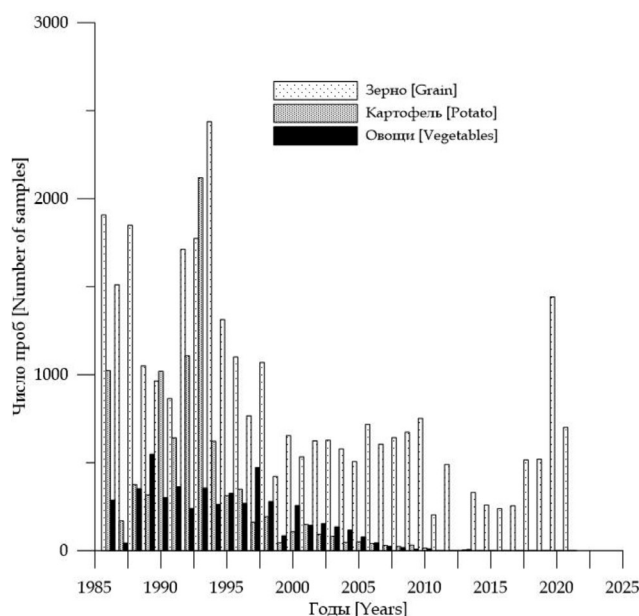


Рис. 1. Объемы отбора проб продукции растениеводства в юго-западных районах Брянской области в 1986–2021 гг.
[Fig. 1. Quantity of crop production samples taken annually in southwestern districts of Bryansk region in 1986–2021]

полуснижения ($T_{1/2}$), то есть периодов времени, в течение которого содержание радионуклидов в выделенных видах продукции под влиянием всех факторов уменьшается в 2 раза [3].

Таким образом, для аппроксимации данных мониторинга в настоящей работе в большинстве случаев использовалась формула:

$$Q(t) = Q(t_k) \times e^{-\lambda_{эфф} \times (t-t_k)}, \lambda_{эфф} = \frac{0,693}{T_{эфф}}$$

где $T_{эфф}$ – эффективный период полуснижения содержания ¹³⁷Cs в сельскохозяйственной продукции (годы); $\lambda_{эфф}$ – постоянная снижения, соответствующая периоду полуснижения $T_{эфф}$. (год⁻¹), t – текущее время (годы), t_k – начальная дата, соответствующая периоду времени, для которого приводятся оценки (годы).

При анализе экспериментальных данных также использовались экологические периоды полуснижения ($T_{эк}$), которые определены как периоды времени, в течение которого содержание радионуклидов в выде-

¹ СанПиН 2.3.2.1078-01, 2002 [SanPiN 2.3.2.1078-01. Food raw materials and food products. Hygienic requirements for safety and nutritional value of food products]; СанПиН 2.3.2.2650-10. Дополнения и изменения № 18 к санитарно-эпидемиологическим правилам и нормативам СанПиН 2.3.2.1078-01 [SanPiN 2.3.2.2650-10. Supplements and Amendments No. 18 to SanPiN 2.3.2.1078-01] (In Russ.).

ленных видах продукции под влиянием всех факторов, за исключением радиоактивного распада, изменяется в 2 раза:

$$T_{\text{эк}} = \frac{T_{\text{эфф}} \times T^{rd}}{T_{\text{эфф}} - T^{rd}}, T^{rd} = \frac{0,693}{\lambda^{rd}},$$

где λ^{rd} – постоянная радиоактивного распада (годы⁻¹), а T^{rd} – период полураспада ¹³⁷Cs.

Отметим, что этот подход использовался для оценки параметров как снижения, так и увеличения содержания радионуклидов в сельскохозяйственной продукции.

Реабилитационные мероприятия

Как отмечено выше, при анализе закономерностей динамики содержания радионуклидов в сельскохозяйственной продукции необходимо учитывать влияние защитных и реабилитационных мероприятий [5, 7]. В рамках национальных программ по преодолению последствий аварии на Чернобыльской АЭС в юго-западных районах Брянской области проводились работы по реабилитации загрязнённых территорий. Особенно интенсивно мероприятия применялись в первые годы после Чернобыльской аварии (рис. 2).

Внесение минеральных удобрений в расчете на гектар пашни в 1986–1990 гг. достигало 257 кг га⁻¹ (по области в целом 209 кг га⁻¹ д.в.²), а в 1991 г. – 252 и 212 кг га⁻¹ соответственно. Под зерновые культуры в эти же годы было внесено до 240 кг га⁻¹ д.в., а под картофель – 386–430 кг га⁻¹ д.в. В этот период в качестве основной защитной меры применяли повышенные дозы калийных удобрений. Дополнительные дозы калийных удобрений составляли: в 1986–1990 гг. по 56 кг га⁻¹ K₂O [4, 12].

Начиная с 1993 г., в хозяйствах загрязнённых районов Брянской и других областей снижались объёмы применения средств химизации и агрономелиоративных мероприя-

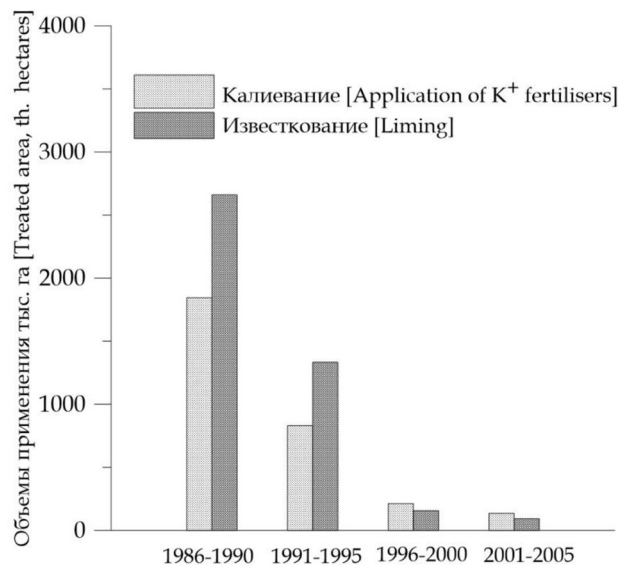


Рис. 2. Масштабы применения мероприятий по снижению содержания ¹³⁷Cs в продукции растениеводства в 1986–2005 гг. [3, 8]

[Fig. 2. Implementation of countermeasures for reduction of ¹³⁷Cs in plant products in 1986–2005 [3, 8]

тий. Применение минеральных удобрений на 1 га пашни и под отдельные культуры по загрязнённым районам уменьшилось в 3–8 раз. В 1995 г. продуктивность пашни резко упала и по загрязнённым районам составила 13,9 ц га⁻¹ кормовых единиц.

После 2006 г. агрохимические мероприятия проводились в рамках Федеральной целевой программы (ФЦП) «Сохранение и восстановление плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения и агроландшафтов как национального достояния России на 2006–2013 годы» (табл. 2) [13].

Объёмы агротехнических и агрохимических работ на загрязнённых землях Брянской области, тыс. га [13]

Таблица 2

Annual rates of agrotechnical and agrochemical measures application in the contaminated areas of Bryansk region, thousand hectares [13]

[Table 2

Виды работ [remedial options]	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Агротехнические [Agrotechnical]	14,6	11,9	9,4	11,2	9,5	14,5	12,5	8,0
Известкование [Liming]	3,5	2,9	2,2	0,7	1,1	1,4	2,2	1,9
Фосфоритование [Phosphorus application]	2,1	3,6	2,5	-	-	-	0,6	0,6
Калиевание [Potassium application]	5,0	2,3	1,0	1,5	1,5	2,8	2,2	1,7
Итого [Total]	25,2	20,7	15,1	13,4	12,1	18,7	17,5	12,2

² д.в. – действующее вещество, то есть количество элемента питания в удобрении, которое может быть использовано растением.

Проведение этих мероприятий во многих случаях определяло снижение загрязнения продукции, и эффект от их проведения должен учитываться при оценке динамики загрязнения этой продукции после аварии на Чернобыльской АЭС.

Анализ данных

При оценке закономерностей снижения содержания ^{137}Cs в продукции использовались данные, количество которых приведено в таблице 1. Для обработки информации использовались статистические методы, предложенные в работе [14]. К каждой выборке (то есть комбинации вид продукции/год) применялся критерий для отбраковки данных, которые впоследствии удалялись. Так как большинство выборок соответствовало логнормальному закону, данные перед отбраковкой логарифмировались, а процедура отбраковки применялась к логарифмам исходных данных. К малым выборкам (менее 25 значений) применялся критерий Диксона, а к более крупным – стандартные критерии [10, 16]. После отбраковки данных для каждой выборки подсчитывалось среднее геометри-

ческое и 95% доверительный интервал. Эффективные периоды полуснижения КП рассчитывались с помощью стандартных методов линейной регрессии [15].

Концентрации ^{137}Cs в пробах зерна, картофеля и овощей в 1986 г.

Данные по концентрациям ^{137}Cs в рассматриваемых видах сельскохозяйственной продукции приведены в таблице 3. Данные мониторинга были усреднены по хозяйствам, в которых были отобраны пробы в 1986 г. Вследствие определенных ограничений ресурсов в 1986 г. сплошной отбор зерна и картофеля проводился в 75–80% хозяйств, тогда как отбор проб овощей охватил только около 44% хозяйств. Количество измерений, выполненных в 1986 г., составило 1907 проб зерна, 1024 проб картофеля и только 286 проб овощей. Вследствие этого оценки статистических параметров загрязнения продукции для зерна и картофеля в 1986 г. были сделаны на уровне отдельных районов, тогда как для овощей аналогичные оценки были сделаны для 6 районов в целом.

Таблица 3

Параметры распределения средних по хозяйствам концентраций ^{137}Cs в пробах зерна, картофеля и овощей, отобранных в юго-западных районах Брянской области в 1986 г., Бк/кг

[Table 3]

Parameters of distribution of mean by farms ^{137}Cs concentrations in samples of grain, potatoes and vegetables taken in southwestern districts of Bryansk region in 1986, Bq/kg

Районы [Districts]	Число хозяйств [Number of collective farm]	Среднее [Mean]	Стандартное отклонение [St. Dev]	Геометрическое среднее [G. Mean]	Медиана [Median]	Мин [Min]	Мак [Max]
<i>Зерно [Grain]</i>							
Гордеевский [Gordeyevsky]	12	1224	885	1003	925	370	3254
Злынковский [Zlunkovsky]	10	173	48	173	174	111	280
Климовский [Klimovsky]	16	355	195	352	315	299	465
Клинцовский [Klintsovsky]	16	382	382	7	381	371	395
Красногорский [Krasnogorsky]	16	1601	579	1483	1561	466	2525
Новозыбковский [Novozybkovsky]	18	182	144	154	135	69	698
По 6 районам [For 6 districts]	88	652	683	420	376	69	3254
<i>Картофель [Potato]</i>							
Гордеевский [Gordeyevsky]	12	66.1	41	59.1	54	30	189
Злынковский [Zlunkovsky]	10	104	37	99.8	95	75	666
Климовский [Klimovsky]	25	131	85.8	106	108	27	330
Клинцовский [Klintsovsky]	15	349	179	310	295	143	759
Красногорский [Krasnogorsky]	15	277	51,1	272	270	190	330

Районы [Districts]	Число хозяйств [Number of collective farm]	Среднее [Mean]	Стандартное отклонение [St. Dev]	Геометрическое среднее [G. Mean]	Медиана [Median]	Мин [Min]	Мак [Max]
Новозыбковский [Novozybkovsky]	17	104	25,1	101	100	72	148
По 6 районам [For 6 districts]	94	173	133	133	121	27	759
Овощи [Vegetables]							
По 6 районам [For 6 districts]	56	137	70.3	122	122	37	389

Средние концентрации ^{137}Cs в зерне в хозяйствах варьировали от 69 до 3254 Бк кг⁻¹, в картофеле – от 27 до 759 Бк кг⁻¹ и в овощах от 37 до 389 Бк кг⁻¹. Вариабельность концентраций в отдельных пробах была существенно больше и составила от 37 до 5550 Бк кг⁻¹ для зерна, от 37 до 1443 Бк кг⁻¹ для картофеля и от 37 до 914 Бк кг⁻¹ – для овощей.

Максимальные уровни содержания ^{137}Cs в зерне отмечены в Красногорском и Гордеевском районах, а минимальные – в Новозыбковском и Злынковском районах. Наибольшие уровни содержания ^{137}Cs в картофеле отмечаются в Клинцовском и Красногорском районах (около 300 Бк кг⁻¹), в Злынковском, Новозыбковском и Климовском районах уровни содержания ^{137}Cs находятся в диапазоне 100–130 Бк кг⁻¹, а минимальные уровни характерны для Гордеевского района. При этом следует отметить отсутствие явной зависимости загрязнения зерна и картофеля ^{137}Cs от плотности выпадений (см. табл. 3).

Авария на Чернобыльской АЭС произошла в конце апреля 1986 г. до начала посадок картофеля и овощей и посева яровых ячменя и пшеницы. В то же время следует отметить, что около 70% посевных площадей зерновых в юго-западных районах Брянской области составляли озимые, которые были высеяны осенью 1985 г. Таким образом, пути загрязнения яровых зерновых культур, картофеля и овощей несколько отличались от загрязнения озимой ржи и пшеницы. В первый год после аварии корневое поступление в озимые растения было возможно только из верхнего горизонта почвы, тогда как в яровые и пропашные культуры поступление радионуклидов происходило из всего почвенного горизонта. Таким образом, уровни загрязнения ^{137}Cs зерна озимых культур отличались от уровней загрязнения, характерных для яровых.

Среднее значение содержания ^{137}Cs в зерне в юго-западных районах Брянской области было в 4,8 раза больше, чем в овощах, и в 3,8 раза больше, чем в картофеле. Эти отношения значительно варьируют в зависимости от района и меняются для картофеля от 18,5 для Гордеевского района до 1,1 для Клинцовского района.

Во всех рассмотренных случаях средние значения больше медианы и геометрического среднего, а коэффициент вариации данных варьирует от 0,02 (зерно Клинцовского района) до 0,79 для проб зерна, отобранного в хозяйствах Новозыбковского района, при этом вариабельность данных по содержанию ^{137}Cs в зерне была существенно выше, чем для картофеля и овощей. Такого рода различия вариабельности данных для зерна от вариабельности значений для овощей и картофеля может в числе прочих причин объясняться тем, что выборка

данных для зерна включает зерно как озимых, так и яровых культур, отличающихся механизмами загрязнения конечного урожая.

Динамика содержания ^{137}Cs в продукции растениеводства

Данные по динамике изменения ^{137}Cs в зерне, картофеле и овощах представлены на рисунках 3–5. Для количественного сравнения динамики содержания ^{137}Cs в рассматриваемых видах сельскохозяйственной продукции на рисунках 3–5 представлены периоды полуснижения концентраций радионуклида в первый период после аварии (с 1987 до 1990 г.), восстановительный период (с 1991 по 2010 г.) и третий, отдаленный период, в качестве которого рассматривался интервал времени после 2010 г. Верхний индекс, указанный в периодах полуснижения на рисунках 3–5, соответствует номеру периода. Для сравнения на рисунках 3–5 показано снижение содержания ^{137}Cs в продукции в предположении, что оно определялось только радиоактивным распадом.

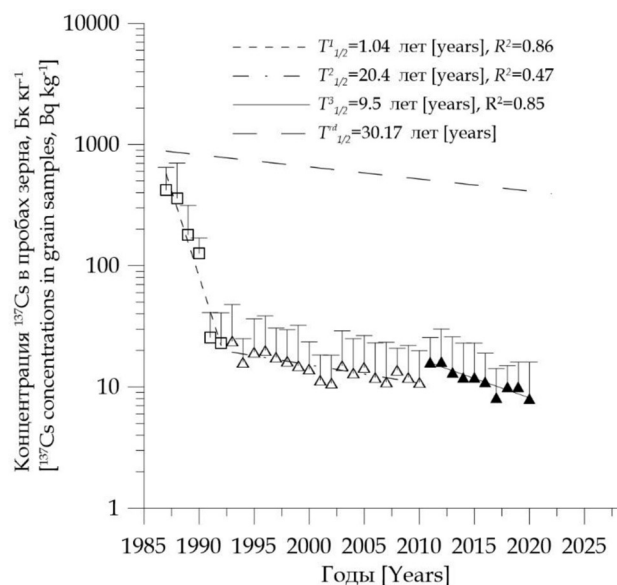


Рис. 3. Динамика снижения концентрации ^{137}Cs в зерне юго-западных районов Брянской области после аварии на Чернобыльской АЭС. Данные, соответствующие выделенным периодам после аварии, представлены разными символами [Fig. 3. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in grain produced in southwestern districts of Bryansk region after the Chernobyl accident. Data corresponding to different periods after the accident are represented by different symbols]

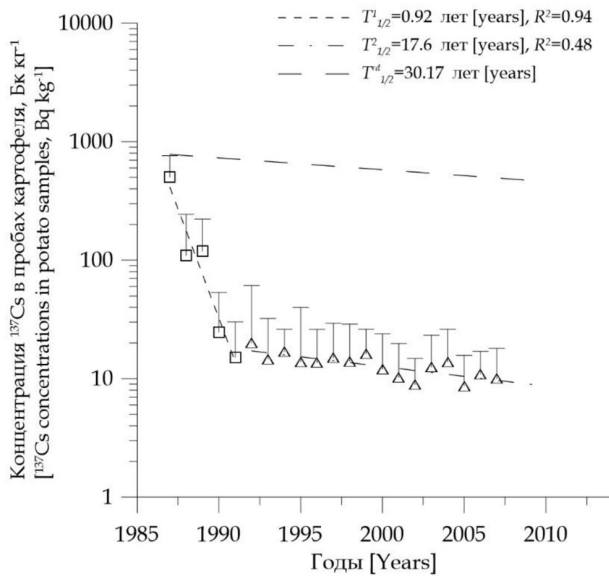


Рис. 4. Динамика снижения содержания ^{137}Cs в картофеле, производимом в юго-западных районах Брянской области после аварии на Чернобыльской АЭС. Данные, соответствующие выделенным периодам после аварии, представлены разными символами

[Fig. 4. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in potato produced in southwestern districts of Bryansk region after the Chernobyl accident. Data corresponding to different periods after the accident are represented by different symbols]

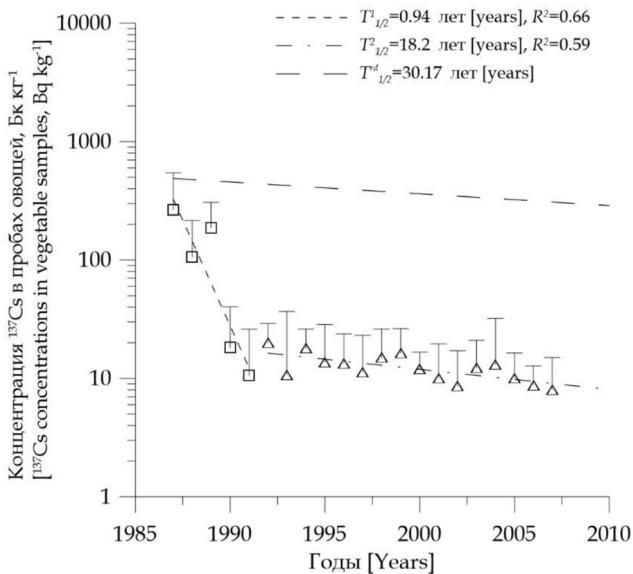


Рис. 5. Динамика снижения содержания ^{137}Cs в овощах, производимых в юго-западных районах Брянской области после аварии на Чернобыльской АЭС. Данные, соответствующие выделенным периодам после аварии, представлены разными символами

[Fig. 5. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in vegetables produced in southwestern districts of Bryansk region after the Chernobyl accident. Data corresponding to different periods after the accident are represented by different symbols]

Видно, что динамика снижения концентраций ^{137}Cs как в зерне, так и в картофеле и овощах носила неравномерный характер. При этом можно выделить 2 или 3 (для зерна) периода, когда темпы снижения этого радионуклида в про-

дукции существенно отличались. Данные этих рисунков также иллюстрируют различия в интенсивности снижения загрязнения продукции в различные периоды времени после аварии ($T^1_{1/2}$, $T^2_{1/2}$ и $T^3_{1/2}$) и уменьшения содержания ^{137}Cs продукции только вследствие радиоактивного распада ($T^d_{1/2}$). Из приведенных рисунков видно, что за 35 лет после Чернобыльской аварии содержание ^{137}Cs в продукции растениеводства уменьшилось в 30–50 раз (по сравнению с 1987 г.). Вклад радиоактивного распада в снижение загрязнения продукции был существенно меньше вклада других факторов, таких как проведение защитных мероприятий и сорбция цезия в почвенно-поглощающем слое почвы, не превышая нескольких процентов от общего снижения.

Активное проведение мероприятий, таких как известкование кислых почв и внесение повышенных доз минеральных удобрений, способствовало быстрому снижению загрязнения продукции растениеводства в период времени с 1987 до 1990 г. Другим фактором, обуславливающим уменьшение содержания продукции в этот период, было естественное снижение содержания ^{137}Cs за счет сорбции этого радионуклида почвенно-поглощающим комплексом почв. Для этого интервала времени характерны самые короткие периоды полуснижения содержания этого радионуклида в продукции – от 0,92 (картофель) до 1,04 года (зерно). Периоды полуснижения ^{137}Cs в этих видах продукции, рассчитанные для территорий, где мероприятия не проводились, были в 2–3 длиннее [2].

Начиная с 4-го года после аварии, ухудшение экономического состояния хозяйств не позволило выполнить необходимые защитные мероприятия, что приводило к снижению плодородия почв до уровня, который соответствовал более низкому агрофону [4, 13]. Так, в Новозыбковском районе при недостатке внесения калийных удобрений под зерновые культуры и картофель содержание ^{137}Cs в продукции в 1995–1996 гг. увеличилось более чем в 1,5–2 раза по сравнению с периодом, когда они применялись в оптимальных объемах для снижения загрязнения продукции (1991–1992 гг.) [8, 9]. Внедрение мероприятий ФЦП «Сохранение и восстановление плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения и агроландшафтов как национального достояния России на 2006–2013 годы» позволило в определенной степени нивелировать снижение плодородия почв.

В последующем, начиная с 2011 г., динамика загрязнения продукции определялась разнонаправленными процессами, то есть увеличением поступления ^{137}Cs в растения в результате снижения плодородия почв, которое компенсировалось естественным снижением биологической доступности радионуклидов в почвах под действием геохимических процессов, часто называемых в литературе «старением цезия». В результате этих процессов снижения содержания радионуклидов в продукции сильно замедлилось, а период полуснижения, в зависимости от вида продукции, составил 17,8 года для овощей, 18,2 для картофеля и 20,4 для зерна.

Периоды наблюдений для картофеля и овощей включали только 2 временных интервала, в пределах которых периоды полуснижения отличались. Анализ информации по содержанию ^{137}Cs в зерне выполнен на основе данных мониторинга, который проводился до 2021 г., что позволило выделить еще 1 период полуснижения, равный 9,5 года.

Периоды полуснижения содержания ¹³⁷Cs в продукции растениеводства

Недостаток данных по содержанию ¹³⁷Cs в овощах не позволяет оценить периоды полуснижения содержания этого радионуклида на уровне отдельных районов. Вследствие этого в таблице 4 представлены эффективные периоды полуснижения содержания ¹³⁷Cs только в зерне и картофеле.

Как уже отмечалось, динамика изменения содержания ¹³⁷Cs как в зерне, так и в картофеле носила ярко выраженный неоднородный характер. Данные для зерна позволяют выделить 3 периода, динамика в пределах каждого из которых довольно близка, а периоды полуснижения между которыми статистически различны (см. рис. 3). К ним можно отнести периоды времени с 1987 по 1990 г., с 1991 по 2010 г. и с 2011 по 2021 г. Первый период охватывает промежуток времени, когда агрохимические мероприятия применялись в постоянно увеличивающихся масштабах. Второй период включает промежуток времени, когда объемы проведения защитных мероприятий сокращались, а их проведение ограничивалось проведением в относительно небольшом числе «критических» хозяйств. В

третий период эффект от проведения мероприятий был практически нивелирован, а снижение загрязнения продукции определялось главным образом естественным снижением биологической доступности ¹³⁷Cs в почве и радиоактивным распадом.

Первый период полуснижения содержания ¹³⁷Cs в зерне (1987–1990 гг.) находится в диапазоне от 0,8 до 1,3 года (за исключением Злынковского района), при высоких значениях R² (0,89–0,99). В Стародубском районе проведение мониторинга продукции растениеводства было начато в 1993 г., что не позволило оценить первый период полуснижения. Снижение содержания ¹³⁷Cs в зерне замедлилось во всех районах после 1991 г., а периоды полуснижения (с 1991 по 2011 г.) находятся в диапазоне от 17,8 (Стародубский район) до 265 лет (Клинцовский район). Отметим, что в последнем случае наблюдаемого снижения содержания цезия практически не отмечается, а среднегеометрические значения концентрации ¹³⁷Cs в зерне варьируют от 5 до 12 Бк кг⁻¹ со средним геометрическим значением 7,9 Бк кг⁻¹. Экологические периоды полуснижения незначительно отличаются от эффективных для 1987–1990 гг. (первого периода) и значитель-

Таблица 4

Эффективные периоды полуснижения содержания ¹³⁷Cs в пробах зерна и картофеля, отобранных в юго-западных районах Брянской области в 1987–2021 гг.

[Table 4

Effective half-lives of ¹³⁷Cs concentrations in grain and potato samples taken in the southwestern districts of the Bryansk region in 1987–2020]

Районы [Districts]	T ¹ _{1/2'} лет [years]	R ²	T ² _{1/2'} лет [years]	R ²	T ³ _{1/2'} лет [years]	R ²
<i>Зерно [Grain]</i>						
Гордеевский [Gordeyevsky]	1,2(1,3) ¹	0,96	-29,4(1152)	0,04	12,4 (21,1)	0,63
Злынковский [Zlunkovsky]	1,3(1,4)	0,19	21,0(69)	0,30	-11,9 ² (-8,4)	0,68
Климовский [Klimovsky]	0,9(0,93)	0,98	19,8(58)	0,47	10,5 (16,1)	0,71
Клинцовский [Klintsovsky]	0,7(0,72)	0,95	265(-34,1)	0,02	4,8 (5,7)	0,93
Красногорский [Krasnogorsky]	0,8(0,82)	0,94	24,1(63,0)	0,45	-31,1 (-29)	0,08
Новозыбковский [Novozybkovsky]	0,8(0,82)	0,89	57,5(-63,5)	0,13	10,5 (16,1)	0,94
Стародубский [Starodubsky]	-	-	17,8 (43,4)	0,17	11(17,3)	0,63
<i>Картофель [Potato]</i>						
Гордеевский [Gordeyevsky]	1,1 (1,2)	0,90	16,9(38,4)	0,34	-	-
Злынковский [Zlunkovsky]	0,76 (0,78)	0,95	-16,1(-10,5)	0,63	-	-
Климовский [Klimovsky]	0,95 (0,98)	0,96	26,7(232,1)	0,29	-	-
Клинцовский [Klintsovsky]	0,86 (0,89)	0,99	19,8 (57,6)	0,43	-	-
Красногорский [Krasnogorsky]	1,6 (1,69)	0,72	10,5 (18,1)	0,59	-	-
Новозыбковский [Novozybkovsky]	1,64 (1,73)	0,91	12,4 (21,5)	0,49	-	-

¹ – в скобках приводятся экологические периоды полуснижения содержания ¹³⁷Cs в продукции [ecological half-life values of ¹³⁷Cs concentrations in agricultural products are given in parentheses]

² – знак “-” перед эффективным периодом полуснижения означает, что полупериод соответствует росту содержания ¹³⁷Cs в продукции [sign “-” before the effective half-life means that the half-life corresponds to an increase in the ¹³⁷Cs concentration in the products]

но отличаются для второго (1991–2011 гг.) и третьего (2011–2021 гг.) периодов. В первую очередь, это объясняется тем, что первые периоды намного короче периода полураспада ^{137}Cs – 30,17 лет, вследствие чего снижение концентрации этого радионуклида в сельскохозяйственной продукции практически полностью определяется быстрой сорбцией радионуклида в почве и защитными мероприятиями.

В течение второго периода сорбция радионуклидов протекает существенно медленнее, а прекращение защитных мероприятий также приводит к замедлению снижения или даже к росту загрязнения продукции (рис. 6).

В этот период времени особое значение приобретает зависимость поступления радионуклидов от погодных условий. Известно, что в зависимости от погодных условий конкретного года коэффициенты перехода из почвы в растения могут изменяться до 5 раз [4]. Этим во многом объясняется высокая вариабельность концентраций ^{137}Cs в продукции в условиях, когда влияние других факторов незначительно либо они компенсируют друг друга.

Начиная с 2011 г., динамика содержания ^{137}Cs в зерне определялась в основном влиянием естественных геохимических процессов в почве и радиоактивным распадом. Характер изменения содержания ^{137}Cs в зерне различных районов в период с 2011 до 2021 г. отличался в зависимости от особенностей проведения мероприятий в этих районах в предыдущие периоды. Так, в Гордеевском, Климовском и Новозыбковском районах отмечалось умеренное снижение, существенный спад отмечен в Клинцовском районе. В Злынковском и Красногорском районах в этот же период наблюдался рост загрязнения продукции, связанный с существенным падением плодородия почв [13].

Для оценки параметров естественного снижения концентраций ^{137}Cs в зерне данные 2011–2021 гг. были экстраполированы к 1987 г., то есть к первому году, когда все

пахотные угодья, подвергшиеся загрязнению, были перепаханы (см. рис. 6). При этом учитывалось, что естественное снижение биологической доступности ^{137}Cs в почве также носит неравномерный характер и наиболее быстро протекает в первый период после поступления «свежего» ^{137}Cs в почвенный раствор. Полученные результаты показывают, что оцененные таким образом эффективные периоды полуснижения находятся в диапазоне от 8,2 до 13,5 лет, а экологические периоды полуснижения – от 13 до 19,8 лет. Отметим, что эти оценки хорошо согласуются со средним эффективным периодом полуснижения, рассчитанным для 6 районов, находящихся в зоне интенсивного загрязнения. Следует также отметить, что периоды полуснижения достаточно хорошо согласуются с результатами предыдущих исследований [17, 18], а также с данными работ, выполненными в других регионах Европы после аварии на Чернобыльской АЭС.

Первые эффективные периоды полуснижения содержания ^{137}Cs в картофеле варьируют в зависимости от особенностей проведения защитных мероприятий и характеристик почвы в отдельных районах от 0,76 до 1,64 года, а вторые – от 10,5 до 26,7 лет. Следует отметить динамику содержания этого радионуклида в картофеле в Злынковском районе, где после весьма быстрого и сильного снижения концентраций ^{137}Cs в картофеле после 1994 г. отмечен медленный рост содержаний ^{137}Cs с периодом 16 лет, что объясняется недостаточной компенсацией снижения агрофона геохимическим связыванием ^{137}Cs в почве (рис. 7).

Заключение

Анализ данных по закономерностям изменения содержания ^{137}Cs в продукции растениеводства показывает, что снижение концентрации этого радионуклида в юго-западных районах Брянской области как в зерне, так и в картофеле и овощах во многом определялось динамикой прове-

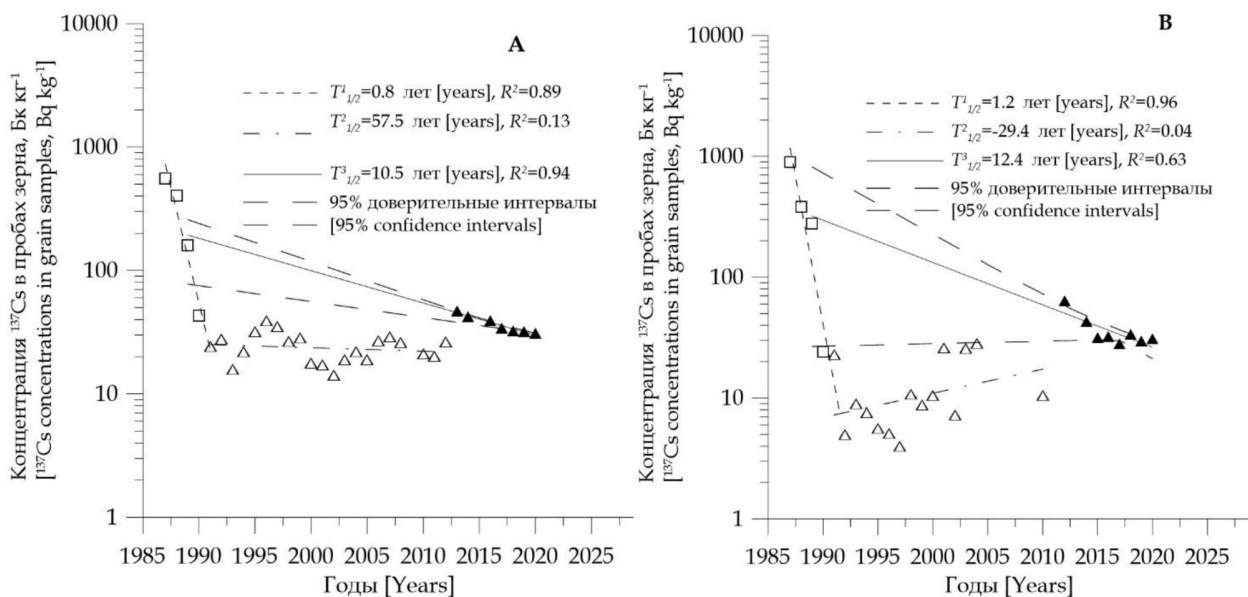


Рис. 6. Динамика снижения содержания ^{137}Cs в зерне Новозыбковского (А) и Гордеевского (В) районов Брянской области.

95% доверительные интервалы показаны прерывистой линией

[Fig. 6. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in grain produced in Novozybkovsky (A) and Gordeyevsky (B) districts of Bryansk region. 95% confidence intervals are shown by the dashed line]

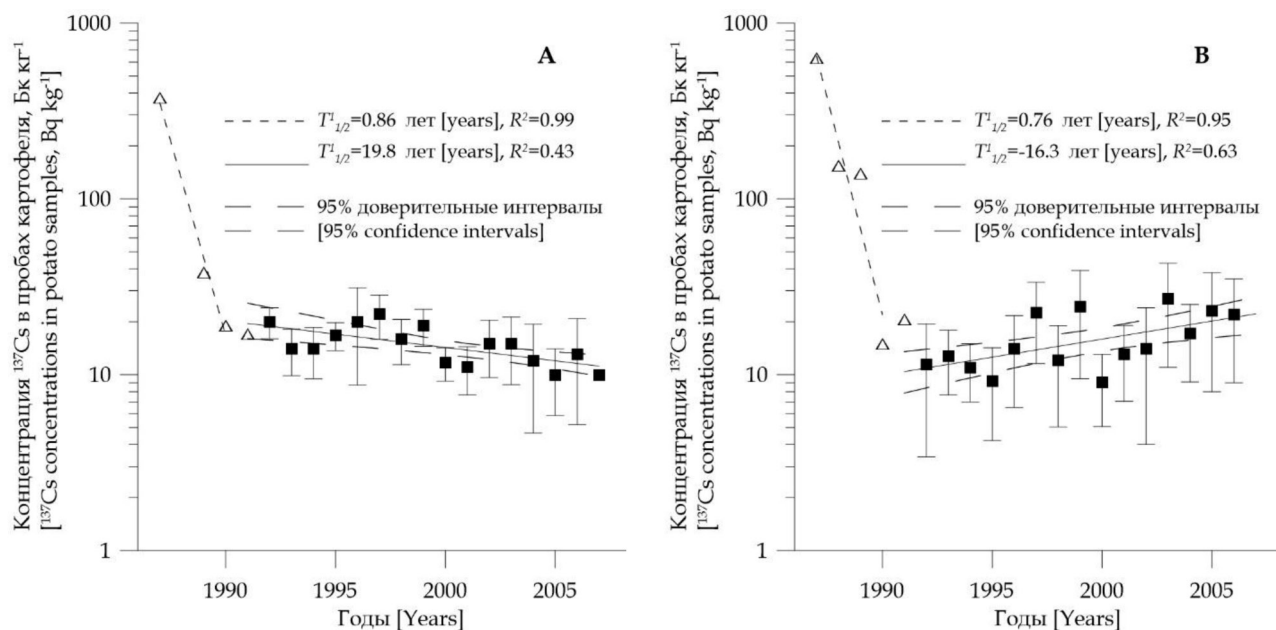


Рис. 7. Динамика снижения содержания ^{137}Cs в картофеле, производимом в Клиновском (А) и Злынковском (В) районах Брянской области

[Fig. 7. Dynamics of ^{137}Cs concentration reduction in potatoes produced in Klintsovsky (A) and Zlunkovsky (B) districts of the Bryansk region]

дения агрохимических защитных мероприятий. Поскольку на поступление ^{137}Cs в растения существенное влияние также оказывали погодные условия, «старение» ^{137}Cs в почве и радиоактивный распад, прогнозирование загрязнения продукции после радиоактивных выпадений является нетривиальной и многофакторной задачей. Вследствие этого при использовании параметров снижения содержания ^{137}Cs в зерновых и пропашных культурах необходимо учитывать историю проведения агрохимических мероприятий и плодородие почв, то есть специфику загрязненных сельскохозяйственных угодий. Представленные данные содержат параметры снижения содержания ^{137}Cs в продукции растениеводства: зерне, картофеле и овощах с учетом конкретных особенностей районов, пострадавших после аварии на Чернобыльской АЭС, позволяя выработать эффективные стратегии перехода к нормальным условиям жизнедеятельности в этих районах.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Фесенко С.В. – разработка концепции исследования; анализ и интерпретация данных; написание текста статьи и 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.

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

Данные исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Авторы выражают свою признательность рецензентам.

Информация о конфликте интересов

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

Литература

1. Алексахин Р.М. Радиоэкологические уроки Чернобыля // Радиационная биология. Радиоэкология. 1993. Т. 33, № 1. С. 3–14.
2. Fesenko S.V., Alexakhin R.M., Sanzharova N.I., Spiridonov S.I. 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. Vol. 60, No 2. P. 155–166.
3. Alexakhin R.M., Fesenko S.V., Sanzharova N.I. Serious radiation accidents and the radiological impact on agriculture // Radiation Protection Dosimetry. 1996. Vol. 64. P. 37–42.

4. Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий: Монография / Под ред. Санжаровой Н.И., Фесенко С.В. М.: РАН, 2018. 278 с. URL: <https://riiae.ru/index.php/deyatelnost/publikatsii-fgbnu-vniirae/444-osnovnye-nauchnye-publikatsii-sotrudnikov-fgbnu-vniirae-v-2018-g> (Дата обращения: 05.07.2022).
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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, 2007 // *Science of the Total Environment*. 2007. Vol. 383. P. 1-24.
9. IAEA, 2006. International Atomic Energy Agency. Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Their Remediation: Twenty Years of Experience. Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group "Environment" (EGE). International Atomic Energy Agency, Vienna, IAEA, 2009.
10. Справочник по радиационной обстановке и дозам облучения, полученным в 1991 году населением территорий Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС / под ред. Балонова М.И. СПб: Издательство «Ариадна – Аркадия», 1993.
11. Справочник по радиационно-гигиенической ситуации на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению в ходе аварии на Чернобыльской АЭС, Москва. 1997. 160 с.
12. Маркина З.Н., Курганов А.А., Воробьев Г.Т. Радиоактивное загрязнение продукции растениеводства Брянской области. Брянский Центр «Агрохимрадиология». Брянск 1997. 242 с.
13. Прудников П.В. Использование агрономических руд и новых комплексных минеральных удобрений на радиоактивно загрязненных почвах. ФГБУ Центр химизации и сельскохозяйственной радиологии «Брянский» Брянск, 2012.
14. 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.
15. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. М., 1983.
16. Закс Л. Статистическое оценивание. М., 1976.
17. 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.
18. Fesenko S.V., Alexakhin R.M., Spiridonov S.I., Sanzharova N.I. Dynamics of ¹³⁷Cs concentration in agricultural products in areas of Russia subjected to contamination after the accident at the Chernobyl nuclear power plant // *Radiation Protection Dosimetry*. 1995. Vol. 60, No 2. P. 155-166.
19. Pröhl G., Ehlken S., Fiedler I., et al. Ecological half-lives of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in terrestrial and aquatic ecosystems // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006. Vol. 91, No 1-2. P. 41-72.

Поступила: 05.07.2022 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, Россия; E-mail: Corwin_17F@mail.ru

Прудников Петр Витальевич – директор Брянского центра «Агрохимрадиология», п. Мичуринский, Брянская область, 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., Емлютина Е.С., Епифанова И.Э., Шубина О.А. Динамика содержания ¹³⁷Cs в сельскохозяйственной продукции Брянской области после аварии на ЧАЭС: зерно, картофель и овощи // *Радиационная гигиена*. 2022. Т. 15, №4. С. 45-57. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-45-57

Dynamics of ^{137}Cs concentrations in agricultural products after the Chernobyl accident: cereals, potato, and vegetables

Sergey V. Fesenko¹, Petr V. Prudnikov², Evgenia S. Emlyutina¹, Irina E. Epifanova¹, Olga A. Shubina¹

¹Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

²Bryansk Center of Agrokhimradiologia, Michurinskiy settlement, Bryansk Region, Russia

The purpose of the study was to analyze the regularities of ^{137}Cs concentrations in grain, potatoes and vegetables in the areas affected the Chernobyl accident. The data describing the countermeasures in the southwestern districts of the Bryansk region are given. The system of radiological monitoring of plant products is described and the relevant data are presented. Dynamics of concentrations both in grain and in potatoes and vegetables had a pronounced heterogeneous character. Reduction of ^{137}Cs concentration in crop production (grain, potato, and vegetables) was determined by the dynamics of agrochemical countermeasures in the contaminated areas, sorption of ^{137}Cs in soil and radioactive decay. It has been revealed that effective half-lives of ^{137}Cs in the above products during intensive implementation of rehabilitation measures (1987-1990) varied within the range from 0,7 up to 1,3 years. Subsequently, in 1991-2011, the decrease of contamination of products slowed down, and in some areas with intensive application of protective measures a certain increase of ^{137}Cs content in products was noted. Effective half-lives during that period ranged 10.5-29 years depending on the peculiarities of application of countermeasures and soil characteristics. The pattern of the ^{137}Cs concentrations in the grain produced in different districts from 2011 to 2021 also differed depending on the history of the countermeasures' application in those districts in the previous periods. The estimation of the effective half-life, equal to 18.2 years, for predicting the reduction of plant product contamination in the long term after the Chernobyl accident has been suggested.

Key words: Chernobyl nuclear power plant, agricultural products, southwestern districts of Bryansk region, monitoring in agriculture, ^{137}Cs .

Information about authors' personal contribution to the work on the article

Fesenko S.V. – definition of the research concept; analyses and interpretation the data; writing or editing the paper; approving the final version of the paper for publication; agreeing to be responsible for all aspects of the paper, ensuring that proper investigation and resolution of issues related to the accuracy or integrity of any part of the paper.

Prudnikov P.V. – collecting, analyses and interpretation of the data; agreeing to be responsible for all aspects of the article, ensuring that any part of the work is properly investigated and resolved for accuracy.

Emlyutina E.S. – processing, analyses and interpretation of the data; agreeing to be responsible for all aspects of the article, ensuring that the accuracy of any part of the work is properly investigated and addressed.

Epifanova I.E. – processing, analyses and interpretation of the data; agreeing to be responsible for all aspects of the article, ensuring that the accuracy or integrity of any part of the work is properly investigated and addressed.

Shubina O.A. – analyses and interpretation of the data; editing the text of the paper; approving the final version of the paper for publication; taking responsibility for all aspects of the paper, ensuring proper investigating and addressing the accuracy or integrity of any part of the work.

Acknowledgements

This research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. 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.

References

1. Alexakhin RM. Radioecological Lessons of Chernobyl. *Radiation Biology. Radioecology*. 1993;33(1): 3-14. (In Russian).
2. 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.
3. Alexakhin RM, Fesenko SV, Sanzharova NI. Serious radiation accidents and the radiological impact on agriculture. *Radiation Protection Dosimetry*. 1996;64: 37-42.
4. 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. – Available from: <https://rirae.ru/index.php/deyatelnost/publikatsii-fgbnu-vniirae/444-osnovnye-nauchnye-publikatsii-sotrudnikov-fgbnu-vniirae-v-2018-g> (Accessed July 05, 2022) (In Russian).

Sergey V. Fesenko

Russian Institute of Radiology and Agroecology

Address for correspondence: Kievskoye shosse, 109 km, Obninsk, 249032 Kaluga region, Russia; E-mail: Corwin_17F@mail.ru

5. 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.
6. Fesenko SV, Jacob P, Alexakhin R, Sanzharova NI, Panov A, Fesenko G, 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.
7. 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.
8. 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.
9. IAEA, 2006. International Atomic Energy Agency. Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Their Remediation: Twenty Years of Experience. Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group "Environment" (EGE). International Atomic Energy Agency, Vienna. IAEA, 2009. 166 p.
10. Handbook on Radiation Situation and Doses of Exposure Received in 1991 by Population of Russian Federation Territories Subjected to Radioactive Contamination as a Result of Chernobyl Accident. Ed. Balonov M.I. St. Petersburg: Ariadna-Arkadia Publishing House; 1993. (In Russian).
11. Handbook on the Radiation and Hygienic Situation in Areas Affected by Radioactive Contamination after the Chernobyl Accident. Moscow; 1997. 160 p. (In Russian).
12. Markina ZN, Kurganov AA, Vorobyov GT. Radioactive contamination of crop production in Bryansk Region. Bryansk Center "Agrokhimradiology", Bryansk; 1997: 242 p. (In Russian).
13. Prudnikov PV. The use of agronomic ores and new complex mineral fertilizers on radioactively contaminated soils. Bryansk, FGBU Center of Chemicalization and Agricultural Radiology "Bryansk"; 2012: 232 p. (In Russian).
14. 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).
15. Ayvazyan SA, Enyukov IS, Meshalkin LD. Applied statistics. Fundamentals of modeling and primary data processing. Moscow: Nauka; 1983. (In Russian).
16. Zaks L. Statistical estimation. Moscow: Nauka; 1976. (In Russian).
17. 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.
18. Fesenko SV, Alexakhin RM, Spiridonov SI, Sanzharova NI. Dynamics of ¹³⁷Cs concentration in agricultural products in areas of Russia subjected to contamination after the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *Radiation Protection Dosimetry*. 1995;60(2): 155-166.
19. Pröhl G, Ehlken S, Fiedler I, Kirchner G, Klemm E, Zibold G. Ecological half-lives of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in terrestrial and aquatic ecosystems. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006;91(1-2): 41-72.

Received: July 05, 2022

For correspondence: Sergey V. Fesenko – principal scientist of Russian Institute of Radiology and Agroecology (Kievskoye shosse, 109 km, Obninsk, 249032 Kaluga region, Russia; E-mail: Corwin_17F@mail.ru)

Petr V. Prudnikov – Director of Bryansk Center of Agrokhimradiologia, Michurinskiy settlement, Bryansk Region, Russia

Evgenia S. Emlyutina – scientist of Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

Irina E. Epifanova – chief specialist of Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

Olga A. Shubina – deputy director of Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

For citation: Fesenko S.V., Prudnikov P.V., Emlyutina E.S., Epifanova I.E., Shubina O.A. Dynamics of ¹³⁷Cs concentrations in agricultural products after the Chernobyl accident: cereals, potato, and vegetables. *Radiatsionnaya Gygiena=Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 4. P. 45-57. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-45-57

Характеристика нейтронных полей на исследовательских ядерных реакторах бассейного типа

М.Д. Пышкина^{1,2}, М.В. Жуковский², А.В. Васильев², А.А. Екидин², Е.И. Назаров²,
М.А. Романова³, М.Н. Аникин⁴

¹ Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

² Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

³ АО «Институт реакторных материалов», Заречный, Россия

⁴ Томский политехнический университет, Томск, Россия

В статье представлены результаты экспериментального определения характеристик нейтронных полей за биологической защитой реакторных установок в физзале водо-водяных исследовательских реакторов бассейного типа. В работе проведены измерения энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения, определение анизотропии и поправочных коэффициентов для индивидуальных дозиметров. Энергетическое распределение плотности потока нейтронного излучения получено с помощью многосферного дозиметра-радиометра МКС-АТ1117М с блоком детектирования БДКН-06 и набором полиэтиленовых сфер-замедлителей. По результатам определения энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения установлены средние значения энергии нейтронов, находящиеся в диапазоне энергий 0,06–0,35 МэВ. Отличие нейтронных полей на обследованных рабочих местах персонала от нейтронных полей, в которых проводится проверка индивидуальных дозиметров, приводит к дополнительной погрешности в оценке таких дозиметрических величин, как амбиентный эквивалент дозы, индивидуальный эквивалент дозы или эффективная доза. Выполненные исследования позволяют провести совершенствование системы индивидуального дозиметрического контроля на основе цикла улучшений: новые знания – экспериментальные исследования – внедрение результатов исследований – регламентация деятельности для снижения облучения работников – анализ полученных данных – новые знания. Анизотропия излучения оценена по результатам измерений накопленной дозы нейтронного излучения индивидуальными термомюлюминесцентными дозиметрами, размещенными на 4 вертикальных плоскостях фантома человека. Адекватные оценки эффективной дозы облучения персонала могут быть получены с использованием поправочных коэффициентов к показаниям индивидуальных дозиметров. Для различных рабочих мест и методов поправочные коэффициенты находятся в диапазоне значений от 0,04 до 0,7.

Ключевые слова: исследовательский реактор, нейтронное излучение, энергетическое распределение, дозиметр-радиометр, поправочный коэффициент, геометрия облучения.

Введение

На сегодняшний день в области обеспечения радиационной безопасности персонала объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) сохраняются направления для существенных улучшений и совершенствований. В частности, при нормальной эксплуатации исследовательских ядерных реакторов (ИЯР) таким направлением является дозиметрия нейтронного излучения. Реальные нейтронные поля в помещениях исследовательских ядерных реакторов разнообразны по интенсивности и диапазону энергий нейтронов, который варьирует от сотых долей эВ (тепловые нейтроны) до десятков МэВ (быстрые нейтроны). Существенные различия спектра энергий нейтронного излучения наблюдаются на отдельных рабочих местах [1]:

- за биологической защитой реакторной установки;
- в местах размещения свежего и/или отработавшего ядерного топлива;
- в местах расположения и использования радиоизотопных источников.

Широкий диапазон энергий нейтронов зачастую приводит к неверной оценке индивидуальной дозы, которую получает персонал, из-за энергезависимости отклика дозиметров. Самая достоверная оценка эффективной дозы нейтронного излучения для персонала может быть получена с использованием информации об энергетическом распределении плотности потока нейтронного излучения и геометрии облучения работников на рабочих местах. На сегодняшний день было выполнено множество ис-

Пышкина Мария Дмитриевна

Уральский федеральный университет; Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук
Адрес для переписки: 620219, Россия, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 20; E-mail: Maria1pyshkina@gmail.com

следований энергетического распределения нейтронов на рабочих местах наиболее распространенных типов реакторных установок: PWR, BWR, GCR, ВВЭР, РБМК и БН [2–14], результаты которых могут быть использованы для реакторных установок аналогичного типа. Такие исследования проводятся и на исследовательских реакторных установках [15, 16], но их количества недостаточно, чтобы охарактеризовать поля нейтронного излучения на других ядерных установках подобного типа.

Цель исследования – экспериментальным способом определить неизвестные характеристики нейтронных полей на рабочих местах исследовательских ядерных реакторов, влияющие на корректность оценки эффективных доз облучения персонала.

Задачи исследования

1. Экспериментальное определение энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения на рабочих местах исследовательских реакторов бассейнового типа ИВВ-2М и ИРТ-Т.
2. Специальные измерения для оценки анизотропии плотности потока нейтронного излучения на рабочих местах.
3. Расчет значений поправочных коэффициентов, учитывающих отличие полей нейтронного излучения на рабочих местах от поверочных.

Материалы и методы

Исследование характеристик нейтронных полей проводилось на отдельных рабочих местах персонала гетерогенных водо-водяных исследовательских реакторов бассейнового типа ИВВ-2М (АО «Институт реакторных материалов», г. Заречный) и ИРТ-Т (Учебно-научный центр «Исследовательский ядерный реактор», Томский политехнический университет, г. Томск) [17, 18]. Номинальная мощность реактора ИВВ-2М составляет 15 МВт, ИРТ-Т – 6 МВт. Тепловыделяющие сборки и другие элементы активной зоны реактора ИВВ-2М имеют гексагональное сечение, в реакторе ИРТ-Т – квадратное. Размер активной зоны ИВВ-2М составляет 500 мм в высоту и 500 мм в диаметре, у ИРТ-Т размер активной зоны составляет 600 мм в высоту и 554×485 мм в сечении. В работе обоих реакторов используют высокообогащенное топливо с обогащением 90% по ^{235}U . Максимальная плотность потока в ИВВ-2М составляет $5 \times 10^{14} \text{ c}^{-1} \text{ см}^{-2}$ тепловых нейтронов и $3 \times 10^{14} \text{ c}^{-1} \text{ см}^{-2}$ быстрых нейтронов. Максимальная плотность потока в ИРТ-Т составляет $1,7 \times 10^{14} \text{ c}^{-1} \text{ см}^{-2}$ тепловых нейтронов и $2 \times 10^{13} \text{ c}^{-1} \text{ см}^{-2}$ быстрых нейтронов. Несмотря на то, что некоторые конструкционные особенности реактора ИРТ были использованы при строительстве ИВВ-2 (бассейн реактора с биологической защитой и пр.), активная зона реактора ИВВ-2 была разработана таким образом, чтобы увеличить поток быстрых нейтронов [19]. Толщина биологической защиты составляет 1,9 м и состоит из железо-цементной смеси высокой плотности с большим содержанием химически связанной воды [20].

Измерения характеристик нейтронного излучения проведены в помещениях здания реактора АО «ИРМ», г. Заречный, и в физическом зале реакторной установки учебно-научного центра «Исследовательский ядерный реактор» ТПУ, г. Томск. На исследовательских реакторах вы-

браны аналогичные точки измерений с целью сравнения характеристики нейтронных полей. На рисунке 1 показаны точки размещения оборудования: а – отметка 8,05 (крышка бака аппарата), б – отметка 3,9 (за биологической защитой реактора), в – отметка 0,0 (напротив горизонтального экспериментального канала). Были исследованы некоторые дополнительные точки: г – отметка 6,3 (за биологической защитой реактора), д – отметка 0,0 (ремонтный коридор) для ИВВ-2М, е – отметки 0,0 (напротив горизонтальных экспериментальных каналов) для ИРТ-Т.

Основными видами работ, при которых возможно облучение персонала нейтронным излучением, являются работы в физическом зале ядерной реакторной установки и работы с отработавшим ядерным топливом. В данной статье рассматриваются только работы, выполняемые в физическом зале реакторной установки за ее биологической защитой. Несмотря на некоторые различия в характеристиках реакторов ИРТ-Т и ИВВ-2М, были выдвинуты предположения о наличии идентичных по характеристикам полей нейтронного излучения. В физическом зале исследовательских реакторных установок были выбраны как одинаково расположенные точки (крышка бака аппарата, балкон на отметке 3.9, напротив горизонтального экспериментального канала), так и другие точки (ремонтный коридор и т.д.). Расположение некоторых точек представлено на рисунке 1.

Измерения энергетического распределения нейтронного излучения проводились дозиметром-радиометром МКС-АТ1117М с блоком детектирования БДКН-06 и набором сфер-замедлителей [21] (рис. 2).

Прибор позволяет определять энергетическое распределение плотности потока нейтронного излучения в диапазоне энергий от 0,025 эВ до 20 МэВ в соответствии с аттестованной методикой МТ АААА.7031.004-2020 «Восстановление энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения. Определение средней плотности потока нейтронного излучения» [22]. Прибор имеет действующую поверку в поле аттестованного PuBe источника. Экспериментальные данные об энергетическом распределении плотности потока нейтронного излучения позволяют определить основные характеристики нейтронного поля: удельный AMBIENTНЫЙ эквивалент дозы, принятое значение МАЭД, среднюю энергию спектра [14, 16]. Принятое значение МАЭД – значение МАЭД, считаемое истинным.

Удельный AMBIENTНЫЙ эквивалент дозы определяется в соответствии с формулой (1):

$$h^*(10) = \frac{1}{\Phi} \int_0^{\infty} h^*(10, E) \cdot \Phi_E(E) dE, \quad (1)$$

где Φ – интегральная плотность потока, $\text{c}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$;
 $h^*(10, E)$ – удельный AMBIENTНЫЙ эквивалент дозы в зависимости от энергии нейтронного излучения, $\text{пЗв} \cdot \text{см}^2$;
 $\Phi_E(E)$ – дифференциальная плотность потока в зависимости от энергии нейтронного излучения, $\text{МэВ}^{-1} \cdot \text{c}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$.
 Принятое значение МАЭД определяется с помощью (2):

$$\dot{H}^*(10) = \int_0^{\infty} h^*(10, E) \cdot \Phi_E(E) dE, \quad (2)$$

где $h^*(10, E)$ – удельный AMBIENTНЫЙ эквивалент дозы в зависимости от энергии нейтронного излучения, рассчитываемый по формуле (1);

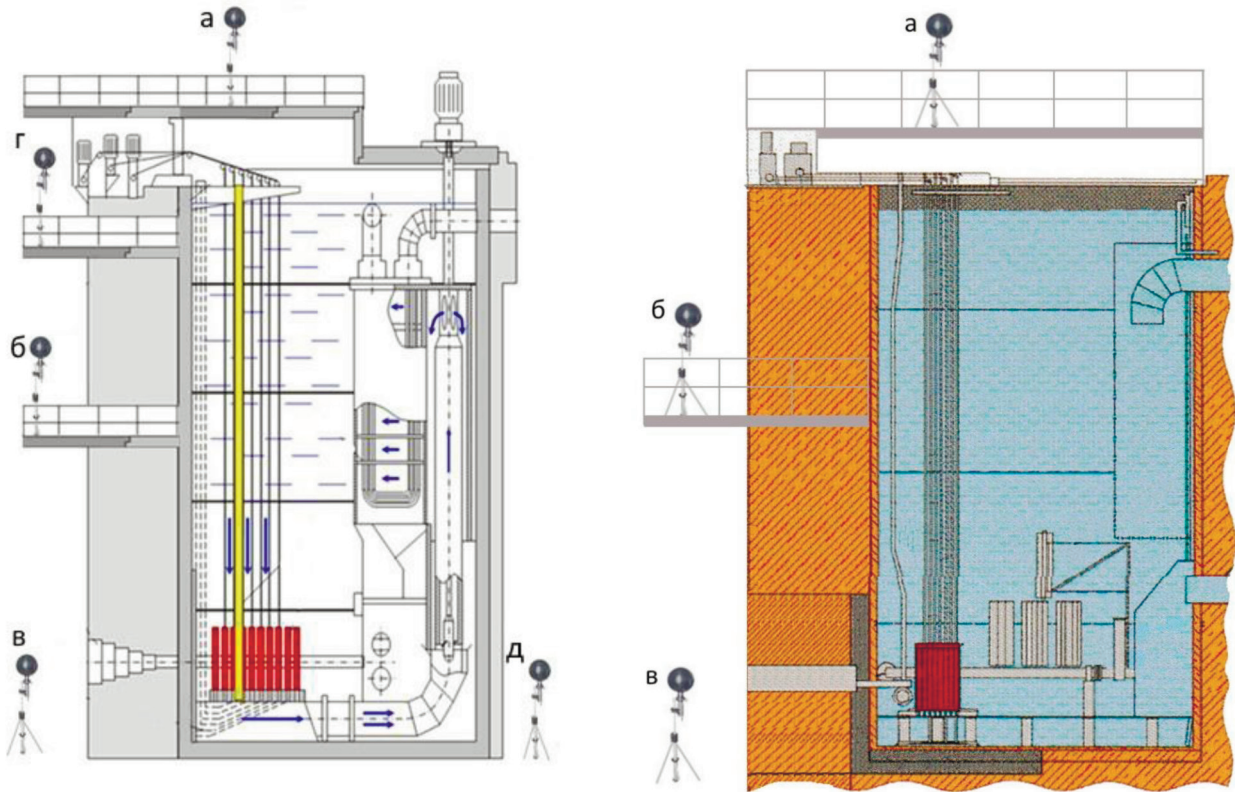


Рис. 1. Точки исследования характеристик нейтронных полей в физическом зале за биологической защитой реакторов ИВВ-2М и ИРТ-Т: а) отметка 8,05 (крышка бака аппарата), б) отметка 3,9 (за биологической защитой реактора), в) отметка 0,0 (напротив горизонтального экспериментального канала), г) отметка 6,3 (за биологической защитой реактора), д) отметка 0,0 (ремонтный коридор)

[Fig. 1. Points for studying the characteristics of neutron fields in the physical hall behind the biological shielding of the IVV-2M and IRT-T: a) Point 8.05 (The tank cover); b) Point 3.9 (in front of active zone behind biological shielding); c) Point 0.0 (in front of the HEC); d) Point 6.3 (behind biological shielding); e) Point 0.0 (repair corridor)]



Рис. 2. Внешний вид дозиметра-радиометра МКС-АТ1117М с блоком детектирования БДКН-06 и набором сфер-замедлителей
[Fig. 2. Appearance of the dosimeter-radiometer AT1117M with the detection unit BDKN-06 and a set of moderator spheres]

$\Phi_E(E)$ – дифференциальная плотность потока в зависимости от энергии нейтронного излучения, $\text{МэВ}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$.
 Средняя энергия определяется как:

$$\bar{E} = \frac{1}{\Phi} \int_0^{\infty} E \cdot \Phi_E(E) dE, \quad (3)$$

где Φ – интегральная плотность потока, $\text{с}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$;
 $\Phi_E(E)$ – дифференциальная плотность потока в зависимости от энергии нейтронного излучения, $\text{МэВ}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$.
 Анизотропия нейтронного излучения оценена с помощью термолюминесцентных (ТЛ) дозиметров, раз-

мещенных на 4 сторонах фантома взрослого человека: спереди на груди, сзади на спине и на двух боковых сторонах, слева и справа (рис. 3). В исследовании использованы ТЛ-дозиметры ДВГН-01 [23]. В качестве фантома использовалась канистра объемом 20 л и размерами 31×16×48 см³, что соответствует размерам рекомендуемого фантома тела человека [24].

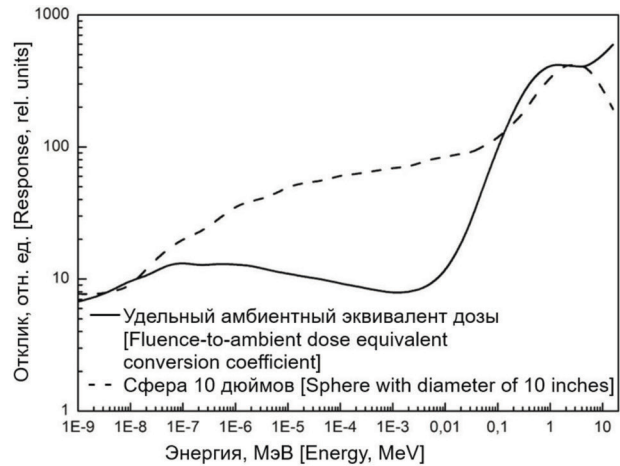


Рис. 3. Пример размещения индивидуальных дозиметров на фантоме
[Fig. 3. The example of personal dosimeters placement on phantom]

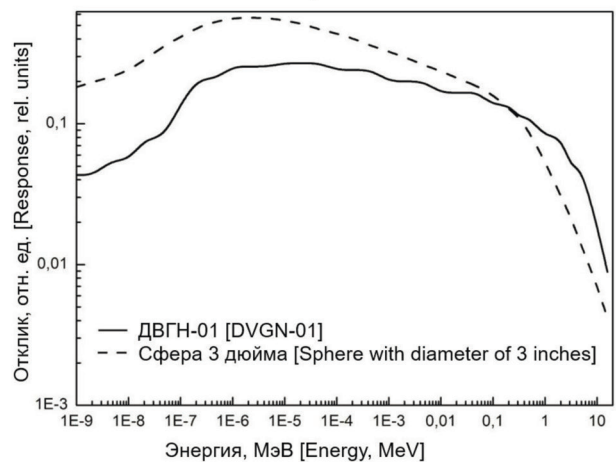
Индивидуальные дозиметры были поверены в поле аттестованного Pu-Be источника. Оценка анизотропии нейтронного излучения позволяет скорректировать оценку эффективной дозы облучения персонала в соответствии с его геометрией облучения. Наиболее распространенные геометрии облучения персонала на ядерных объектах – передне-задняя геометрия (как предельная геометрия облучения направленным полем) и изотропная (как предельная геометрия облучения вращения).

Знание характеристик полей нейтронного излучения позволяет получить сведения о действительных уровнях воздействия на персонал, которые могут в значительной степени отличаться от показаний индивидуальных дозиметров. Для повышения адекватности оценок воздействия нейтронного излучения на персонал к результатам измерений индивидуальными дозиметрами применяют поправочные коэффициенты, зависящие от формы энергетического спектра нейтронов в конкретной точке измерения. На сегодняшний день можно выделить минимум 3 метода, позволяющих определить поправочные коэффициенты. Первый метод (далее Метод 1) применим к определению поправочного коэффициента только для альбедных дозиметров [25, 26]. Данный метод требует наличие спектрометра Боннера, у которого имеются сферы-замедлители нейтронов с откликами, близкими к удельному AMBIENTному эквиваленту дозы и отклику индивидуального дозиметра. В данной работе использовались результаты измерений МКС-АТ1117М с БДКН-06

и сферами-замедлителями нейтронов диаметрами 10 и 3 дюйма. На рисунке 4 представлены для сравнения функции откликов детектора нейтронов для выбранных сфер-замедлителей нейтронов, удельного AMBIENTного эквивалента дозы (рис. 4а) и отклика индивидуального дозиметра (рис 4б).



а)



б)

Рис. 4. Сопоставление откликов сфер с величинами: а) удельный AMBIENTный эквивалент дозы; б) отклик ДВГН-01
[Fig. 4. Comparison of responses of spheres with: a) ambient dose equivalent; b) response of DVGN-01]

В Методе 1 поправочный коэффициент определяется как отношение результатов измерений МАЭД со сферами 10 и 3 дюйма [25, 26]:

$$k = \frac{H^*(10)_{10''}}{H^*(10)_{3''}} \quad (4)$$

где $H^*(10)_{10''}$ – мощность AMBIENTного эквивалента дозы, полученная с использованием МКС-АТ1117М с БДКН-06 и сферой 10 дюймов, мкЗв/ч;

$H^*(10)_{3''}$ – мощность AMBIENTного эквивалента дозы, полученная с использованием МКС-АТ1117М с БДКН-06 и сферой 3 дюйма, мкЗв/ч.

Второй метод (далее Метод 2) определения поправочного коэффициента опирается на экспериментально полученные данные:

– измеренные значения МАЭД, полученные с помощью приборов дозиметрического контроля рабочего места (ДКРМ);

– результат измерения индивидуального эквивалента дозы на передней плоскости фантома с помощью индивидуальных ТЛ-дозиметров.

В Методе 2 поправочный коэффициент может быть найден по формуле (5) [12]:

$$\kappa = \frac{H^*(10)}{M} \quad (5)$$

где $H^*(10)$ – МАЭД, полученные с помощью приборов дозиметрического контроля рабочего места, мкЗв/ч;

M – мощность индивидуального эквивалента дозы нейтронного излучения, полученная путем размещения индивидуального дозиметра на передней плоскости фантома, мкЗв/ч.

Третий метод (далее Метод 3) определения поправочного коэффициента учитывает не только энергетическое распределение плотности потока нейтронного излучения, но и его анизотропию. Данный метод лишен излишнего консерватизма. Подробно описание метода представле-

но в работе [13], поправочный коэффициент в Методе 3 определяется по формуле:

$$\kappa = \frac{H_p(10)}{M} \quad (6)$$

где $H_p(10)$ – принятое значение индивидуального эквивалента дозы нейтронного излучения с учетом энергетического распределения плотности потока и анизотропии нейтронного излучения в точке измерения, мкЗв/ч. Подробно определение принятого значения МИЭД рассматривается в работе [13];

M – результат измерения индивидуального эквивалента дозы на передней поверхности фантома индивидуальными ТЛ-дозиметрами, мкЗв/ч.

Результаты и обсуждение

Нормированное на интегральную плотность потока энергетическое распределение нейтронного излучения, полученное по аттестованной методике на рабочих местах персонала с помощью дозиметра-радиометра МКС-АТ1117М с блоком детектирования БДКН-06 и набором из 6 сфер-замедлителей (диаметрами 3, 4, 6, 8, 10 и 12 дюймов), представлено на рисунке 5.

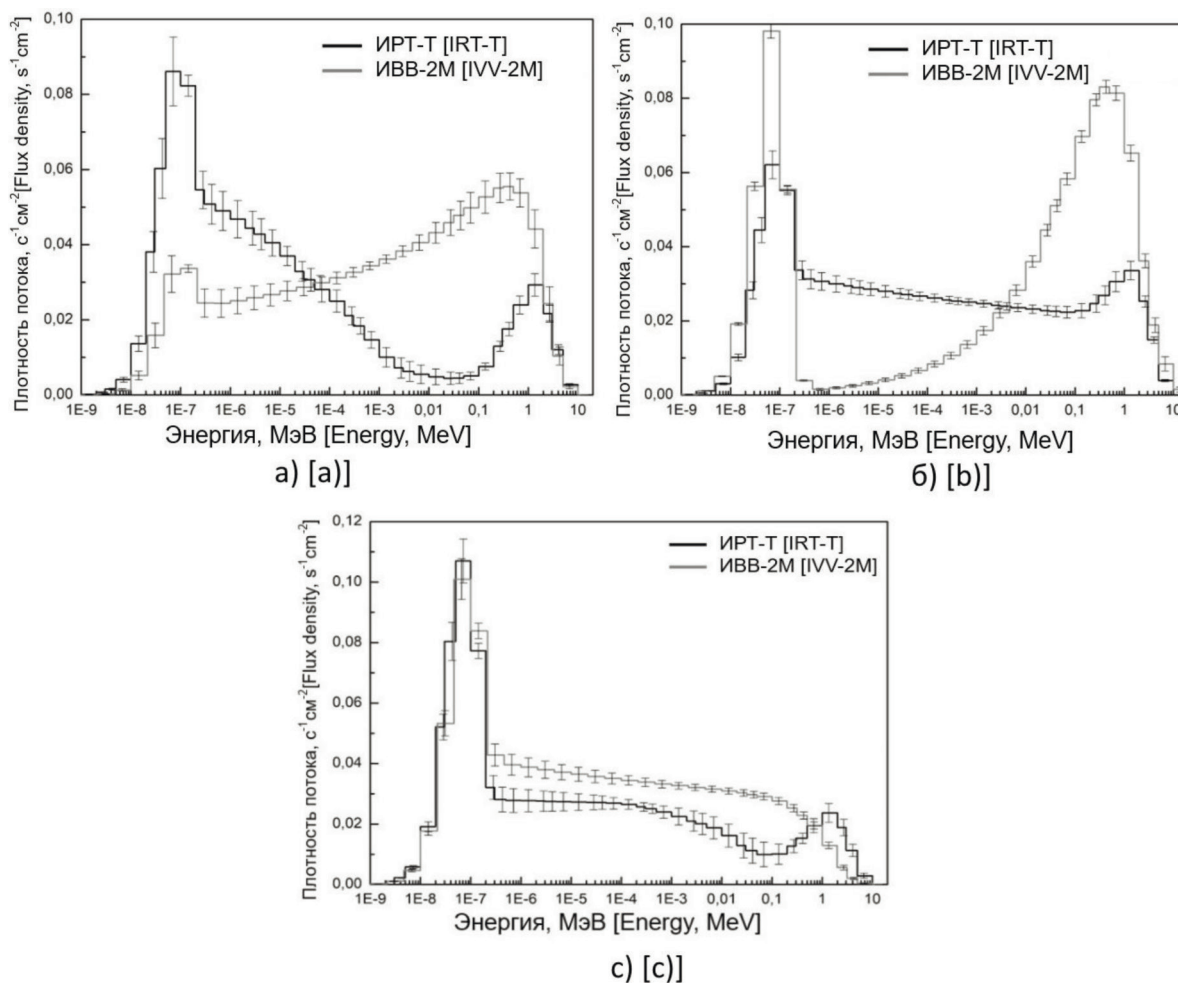


Рис. 5. Энергетическое распределение плотности потока нейтронного излучения в аналогичных точках реакторных установок ИРТ-Т и ИВВ-2М: а) отметка 8,05 (крышка бака аппарата); б) отметка 3,9 (за биологической защитой реактора); в) отметка 0,0 (напротив ГЭК)
[Fig. 5. Energy distribution of neutron flux density at similar points of reactor installations IRT-T and IVV-2M: a) Point 8.05 (the tank cover); b) Point 3.9 (in front of active zone behind biological shielding); c) Point 0.0 (in front of the HEC)]

На рисунке 5 в точках (а) и (б) наблюдается значительное расхождение в форме спектров нейтронов на рассматриваемых реакторных установках. Расхождение спектров в точке (а) может быть вызвано конструкцией активной зоны. Исследовательский реактор в АО «ИРМ» проектировался как высокопоточный с высокой долей быстрых нейтронов, доля быстрых нейтронов по отношению к тепловым нейтронам в активной зоне ИВВ-2М составляет 0,6, а в ИРТ-Т – 0,12. Средние энергии полей в точках измерений представлены в таблице.

Для оценки анизотропии нейтронного излучения индивидуальные ТЛ-дозиметры размещались на 4 сторонах фантома взрослого человека. Результаты измеренных значений представлены на рисунке 6.

Согласно МУ 2.6.5.052-2017 и исходя из данных рисунка 6, можно сделать вывод о наличии на рабочих местах ненаправленного (в том числе изотропного или ротационного) поля излучения в местах за биологической защитой реактора и направленного поля в местах предусмотренного выхода нейтронного излучения (горизонтальные экспериментальные каналы).

Получены значения МАЭД и интегральной плотности потока на основе данных об энергетическом распределении плотности потока нейтронного излучения. В таблице представлены данные о:

- интегральной плотности потока (ϕ , нейтр./ $(\text{с}\cdot\text{см}^2)$);
- принятом значении МАЭД ($H^*(10)$, мкЗв/ч);
- МАЭД, измеренном с помощью МКС-АТ1117М с БДКН-06, и сферах замедлителей нейтронов диаметрами 10 и 3 дюймов ($H^*(10)_{10''}$, мкЗв/ч, $H^*(10)_{3''}$, мкЗв/ч);
- принятом значении МИЭД ($H_p(10)$, мкЗв/ч);
- результате измерений МИЭД индивидуальным дозиметром ДВГН-01 на передней плоскости фантома (М, мкЗв/ч);
- поправочные коэффициенты, полученные по формулам (4)–(6) (k_1 , k_2 и k_3 соответственно).

Неопределенность измерения интегральной плотности потока не превышает 10%, принятого значения МАЭД – 8%, МАЭД, измеренного с помощью МКС-АТ1117М с БДКН-06, и сферах замедлителей нейтронов диаметрами 10 и 3 дюймов – 12%, принятого значения МИЭД – 23%, результатов измерений МИЭД индивидуальными дозиметрами ДВГН-01 на передней плоскости фантома – 20% и поправочных коэффициентов, полученных по формулам (4)–(6), – 24%, 23% и 30% соответственно.

Для отметки 8,05 (крышка бака аппарата реакторной установки) не удалось определить принятое значение МИЭД, а также измерить МИЭД с помощью индивидуального дозиметра ДВГН-01 на поверхности фантома, так как времени экспонирования индивидуальных дозиметров на фантоме оказалось недостаточно для достижения статистически значимого результата измерения.

По результатам, представленным в таблице, можно сделать вывод, что Метод 1 определения поправочного коэффициента для индивидуального дозиметра альбедного типа, основанный на формуле (4), позволяет получать консервативные оценки поправочного коэффициента. Метод 2 является наиболее доступным методом для определения поправочного коэффициента, так как может применяться оборудование, имеющееся на ОИАЭ: дозиметр-радиометр и индивидуальные дозиметры на фантоме. Метод лишен излишнего консерватизма, но не

учитывает анизотропию нейтронного излучения. Видно, что учет энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения, а также анизотропии позволяет добиться снижения систематической погрешности при оценке значения индивидуального эквивалента дозы и уйти от избыточного консерватизма.

Заключение

Несмотря на однотипность исследовательских ядерных реакторов и аналогичность технологических процедур на рабочих местах, условия облучения работников нейтронным излучением специфичны для каждого рабочего места, каждой реакторной установки. Обследованные рабочие места существенно отличаются по характеристикам нейтронных полей: интенсивности нейтронного излучения, распределения нейтронов по энергиям, средним значениям энергий нейтронов. Это обстоятельство указывает на невозможность разработки рекомендаций по совершенствованию систем индивидуального дозиметрического контроля нейтронного облучения для всех однотипных реакторных установок без проведения комплексных экспериментальных исследований основных характеристик нейтронных полей на каждом рабочем месте, где происходит воздействие нейтронов на персонал.

Реальные/установленные отличия энергетического распределения нейтронного излучения на реальных рабочих местах от условий поверки и/или калибровки индивидуальных ТЛ-дозиметров обуславливают необходимость введения поправочных коэффициентов, позволяющих учитывать специфичный отклик дозиметра на каждый диапазон энергий, а также геометрию облучения персонала.

Сравнение 3 применяемых на практике методов определения поправочных коэффициентов показало, что наименее консервативные оценки могут быть получены по результатам комплексных экспериментальных исследований энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения и геометрии облучения персонала. В зависимости от применяемого метода определения поправочного коэффициента переоценка уровней облучения персонала варьирует в диапазоне 1,4–25 раз.

Сведения о личном вкладе авторов

Пышкина М.Д. – разработка дизайна исследования, формулировка научных гипотез, сбор и анализ данных, обработка полученных результатов, написание текста, оформление статьи для представления в редакцию журнала.

Жуковский М.В. – научное руководство исследованием, разработка дизайна исследования.

Васильев А.В. – разработка дизайна исследования, сбор и систематизация данных, финальное редактирование статьи.

Екидин А.А. – разработка дизайна исследования, сбор и анализ данных, обработка полученных результатов.

Назаров Е.И. – сбор и анализ данных, обработка полученных результатов.

Романова М.А. – разработка дизайна исследования, сбор и анализ данных.

Аникин М.Н. – разработка дизайна исследования, редактирование промежуточного варианта статьи.

Характеристики нейтронного излучения в точках измерений на местах пребывания персонала

Таблица

[Table

Characteristics of neutron fields in the measurement points at workplaces]

Характеристика [Characteristic]	Точка измерения [measurement point]		
	Отметка 8.05 (крышка бака аппарата) ИВВ-2М/ИРТ-Т [Point 8.05 (The tank cover) IVV-2M/IRT-T]	Отметка 3.9 (за биологической защитой напротив АЗ) ИВВ-2М/ИРТ-Т [Point 3.9 (in front of active zone behind biological shielding) IVV-2M/IRT-T]	Отметка 0.0 (напротив ГЭК) ИВВ-2М/ИРТ-Т [Point 0.0 (in front of the HEC) IVV-2M/IRT-T]
$E_{cp}, \text{МэВ}$ [E_{av}, MeV]	0,20 / 0,14	0,35 / 0,18	0,06 / 0,23
ϕ , нейтр./ $(\text{с}\cdot\text{см}^2)$ [ϕ , neut./ $(\text{s}\cdot\text{cm}^2)$]	33 / 5,1	110 / 21	19 / 469
$H^*(10)$, мкЗв/ч [$H^*(10)$, $\mu\text{Sv/h}$]	13 / 1,1	53 / 4,4	3,5 / 115
$H^*(10)_{10^{0,1}}$, мкЗв/ч [$H^*(10)_{10^{0,1}}$, $\mu\text{Sv/h}$]	11 / 2,7	51 / 13	3,9 / 300
$H^*(10)_{3^{0,1}}$, мкЗв/ч [$H^*(10)_{3^{0,1}}$, $\mu\text{Sv/h}$]	27 / 13	69 / 43	18 / 911
$H_p(10)$, мкЗв/ч [$H_p(10)$, $\mu\text{Sv/h}$]	- / -	21 / 1,3	0,5 / 80
M , мкЗв/ч [M , $\mu\text{Sv/h}$]	- / -	138 / 18	13 / 835
k_1 (Метод 1) [k_1 (Method 1)]	0,4 / 0,2	0,7 / 0,3	0,2 / 0,3
k_2 (Метод 2) [k_2 (Method 2)]	- / -	0,4 / 0,2	0,3 / 0,14
k_3 (Метод 3) [k_3 (Method 3)]	- / -	0,2 / 0,07	0,04 / 0,10

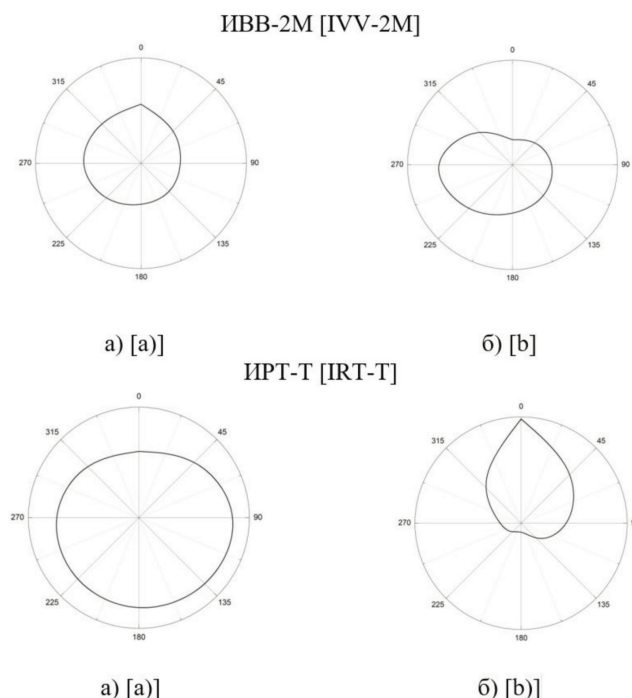


Рис. 6. Анизотропия нейтронного излучения в аналогичных точках реакторных установок ИРТ-Т и ИВВ-2М: а) отметка 3,9 (за биологической защитой реактора); б) отметка 0,0 (напротив ГЭК)
[Fig. 6. Anisotropy of neutron radiation at similar points at reactors IRT-T and IVV-2M: а) Point 3.9 (in front of active zone behind biological shielding); б) Point 0.0 (in front of the HEC)]

Благодарности

Авторы благодарят рецензентов за тщательный анализ статьи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации (грант № МК-4027.2021.4).

Литература

- International Atomic Energy Agency (IAEA), Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purposes: IAEA Technical report series No. 403. 2001. P. 337.
- Bolognese-Milsztajn T., Bartlett D., Boschung M., et al. Individual neutron monitoring in workplaces with mixed neutron/photon radiation // *Radiation Protection Dosimetry*. 2004. Vol. 110, Issue 1-4. P. 753–758. DOI:10.1093/rpd/nch220.
- d'Errico F., Bartlett D., Bolognese-Milsztajn T., et al. Evaluation of individual dosimetry in mixed neutron and photon radiation fields (EVIDOS). Part I: scope and methods of the project // *Radiation Protection Dosimetry*. 2007. Vol. 125, Issue 1-4. P. 275–280. DOI:10.1093/rpd/ncm169.
- Schuhmacher H., Bartlett D., Bolognese-Milsztajn T., et al. Evaluation of individual dosimetry in mixed neutron and photon radiation fields (EVIDOS). Part II: conclusions and recommendations // *Radiation Protection Dosimetry*. 2007. Vol. 125, Issue 1-4. P. 281–284. DOI:10.1093/rpd/ncm167.
- Luszk-Bhadra M., Bolognese-Milsztajn T., Boschung M., et al. Direction distributions of neutrons and reference values of the personal dose equivalent in workplace fields // *Radiation Protection Dosimetry*. 2007. Vol. 125, Issue 1-4. P. 364–368. DOI:10.1093/rpd/ncm189.
- Luszk-Bhadra M., Lacoste V., Reginatto M., Zimbal A. Energy and direction distribution of neutrons in workplace fields: implication of the results from the EVIDOS project for the set-up of simulated workplace fields // *Radiation Protection Dosimetry*. 2007. Vol. 126, Issue 1-4. P. 151–154. DOI:10.1093/rpd/ncm032.
- Park H., Kim J., Choi K. Neutron Spectrum Measurement at the Workplace of Nuclear Power Plant with Bonner Sphere Spectrometer // *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2008. Vol. 45. P. 298-301. DOI: 10.1080/00223131.2008.10875847.
- Luszk-Bhadra M., Bartlett D., Bolognese-Milsztajn, et al. Characterization of mixed neutron-photon workplace fields at nuclear facilities by spectrometry (energy and direction) within the EVIDOS project // *Radiation Protection Dosimetry*. 2007. Vol. 124, Issue 3. P. 219–229. DOI:10.1093/rpd/ncm419.
- Fernandez F., Bakali M., Tomas M., et al. Neutron measurements in the Vandellos II nuclear power plant with a Bonner sphere system // *Radiation Protection Dosimetry*. 2004. Vol. 110, Issue 1-4. P. 517–521. DOI:10.1093/rpd/nch383.
- Lacoste V., Reginatto M., Asselineau B., Muller H. Bonner sphere neutron spectrometry at nuclear workplaces in the framework of the EVIDOS project // *Radiation Protection Dosimetry*. 2007. Vol. 125, Issue 1-4. P. 304–308. DOI:10.1093/rpd/ncm161.
- Luszk-Bhadra M., Derbau D., Hallfarth G., et al. Measurement of energy and directional distribution of neutron fluence inside a nuclear power plant // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 2002. Vol. 476. P. 457–462. DOI:10.1093/rpd/nch179.
- Алексеев А.Г., Косьяненко Е.В., Суманеев О.В., Крючков В.П. Измерение спектров нейтронного излучения при пуске 3-го блока Калининской АЭС // *АНРИ*. 2006. Т. 45, №2. С. 55-61.
- Алексеев А.Г., Алексеев П.А. Спектры нейтронов на рабочих местах персонала Балаковской АЭС // *Евразийский Союз Ученых. Технические науки*. 2020. Т. 70, № 2. С. 20-26. DOI:10.31618/ESU.2413-9335.2020.2.70.534.
- Pyshkina M., Vasilyev A., Ekin A., et al. Study of neutron energy and directional distribution at the Beloyarsk NPP selected workplaces // *Nuclear Engineering and Technology*. 2020. DOI:10.1016/j.net.2020.10.015.
- Алексеев А.Г., Бараненков Н.Н., Бритвич Г.И., и др. Исследование характеристик нейтронного излучения на ядерно-физических установках для методической поддержки ИДК. Протвино: Препринт ИФВЭ, 2003. 12 с.
- Пышкина М.Д., Васильев А.В., Екидин А.А., Назаров Е.И., Романова М.А. Дозиметрия нейтронного излучения на рабочих местах персонала АО «Институт реакторных материалов» // *Радиационная гигиена*. 2021. Т. 14, № 2. С. 89–99. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-2-89-99
- Shchurovskaya M.V., Alferov V.P., Geraskin N.I., et al. Control rod calibration simulation using Monte Carlo code for the IRT-type research reactor // *Annals of Nuclear Energy*. 2016. Vol. 96. P. 332–343. DOI: 10.1016/j.anucene.2016.06.015
- Чертков Ю.Б., Аникин М.Н., Лебедев И.И., и др. Расчетно-экспериментальное определение нейтронно-физических характеристик исследовательского реактора ИРТ-Т // *Атомная энергия*. 2021. Т. 2021, № 1. С. 43–46.
- Гончаров В.В. Исследовательские реакторы. Советская атомная наука и техника. Пред. ред. коллегии К. И. Щелкин. Москва: Атомиздат, 1967. 391 с.
- Томский политехнический университет (ТПУ), Инструкция по эксплуатации исследовательского реактора ИРТ-Т: ТПУ. 2019. URL: https://portal.tpu.ru/SHARED/t/TAHIR/uch_rab/Tab1/%D0%98%D0%BD%D1%81%D1%82%D1%80%D1%83%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F%20%D0%BF%D0%BE%20%D1%8D%D0%BA%D1%81%D0%BF%D0%BB%D1%83%D0%B0%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8%20%20%D0%98.docx (Дата обращения: 19.07.2022).
- Pyshkina M., Vasilyev A., Ekin A., et al. Development and testing of a neutron radiation spectrometer in fields of radionuclide sources // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2163, № 1. P. 1-4. DOI:10.1063/1.5130115.
- УП «Атомтех», МТ АААА.7031.004-2020 «Восстановление энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения. Определение средней плотности потока нейтронного излучения». 2020.
- Санников А.В., Лебедев В.Н., Кустарев В.Н., и др. Индивидуальный дозиметр смешанного излучения ДВГН-01: разработка и исследование характеристик. Протвино: Препринт ИФВЭ, 2005. 13 с.
- International Standard Organization, Радиационная защита. Эталонное рентгеновское и гамма-излучение для калибрования дозиметров и интенсиметров и определения их характеристик как функции энергии фотона. Часть 3. Калибрование поверхностных и личных дозиметров и измерение их характеристик, таких как функция энергии и угол падения: ISO 4037-3. 2019.
- International Standard Organization, Passive neutron dosimetry systems — Part 1: Performance and test requirements for personal dosimetry: ISO 21909. 2021.
- МУ 2.6.5.052-2017. Дозиметрия. Определение индивидуальных эффективных доз нейтронного излучения: утверждены и введены в действие Федеральным медико-биологическим агентством России от 11.10.2017: дата введения 11.10.2017.

Поступила: 20.07.2022 г.

Пышкина Мария Дмитриевна – младший научный сотрудник, ассистент, Уральский федеральный университет; младший научный сотрудник, Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук.
Адрес для переписки: 620219, Россия, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 20; E-mail: Maria1pyshkina@gmail.com

Жуковский Михаил Владимирович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

Васильев Алексей Владимирович – кандидат технических наук, научный сотрудник, заведующий радиационной лабораторией, Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

Екидин Алексей Акимович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

Назаров Евгений Игоревич – младший научный сотрудник, Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

Романова Марина Александровна – инженер по радиационной безопасности, Институт реакторных материалов, Заречный, Россия

Аникин Михаил Николаевич – начальник службы ядерной безопасности, Учебно-научный центр «Исследовательский ядерный реактор», Томский политехнический университет, Томск, Россия

Для цитирования: Пышкина М.Д., Жуковский М.В., Васильев А.В., Екидин А.А., Назаров Е.И., Романова М.А., Аникин М.Н. Характеристика нейтронных полей на исследовательских ядерных реакторах бассейного типа // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 58-68. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-58-68

Characteristics of neutron fields at pool-type research nuclear reactors

Mariya D. Pyshkina ^{1,2}, Michael V. Zhukovsky ², Aleksey V. Vasilyev ², Aleksey A. Ekinin ², Evgeniy I. Nazarov ², Marina A. Romanova ^{1,3}, Michael N. Anikin ⁴

¹ Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

² Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

³ Institute of Nuclear Materials, Zarechny, Russia

⁴ Tomsk polytechnical university, Tomsk, Russia

The article presents results of experimental determination of the characteristics of neutron fields behind the biological shielding of reactor facilities in the physical hall of pressurized water research reactors of the pool type. In the work, measurements of the energy distribution of the neutron radiation flux density, determination of anisotropy and correction factors for individual dosimeters were carried out. The energy distribution of the neutron radiation flux density was obtained using an MKS-AT1117M multi-sphere dosimeter-radiometer with a BDKN-06 detection unit and a set of polyethylene moderator spheres. Based on the results of determining the energy distribution of the neutron radiation flux density, the average values of the neutron energy were established, which are in the energy range: 0.06–0.35 MeV. The difference between neutron fields at the surveyed personnel workplaces and neutron fields in which individual dosimeters are calibrated leads to an additional error in estimating such dosimetric quantities as ambient dose equivalent, individual dose equivalent or effective dose. The performed studies allow to improve the system of individual dosimetric control based on the cycle of improvements: new knowledge – experimental studies – implementation of research results – regulation of activities to reduce the exposure of workers – analysis of the data obtained – new knowledge. The radiation anisotropy was estimated from the results of measurements of the accumulated dose of neutron radiation by individual thermoluminescent dosimeters placed on four vertical planes of a human phantom. Adequate estimates of the effective dose to personnel can be obtained using correction factors for individual dosimeters. For various workplaces and methods, the correction factors range from 0.04 to 0.7.

Key words: research reactor, neutron radiation, energy distribution, dosimeter-radiometer, correction factor, exposure geometry.

Mariya D. Pyshkina

Ural Federal University; Institute of Industrial Ecology

Address for correspondence: Sofia Kovalevskaya str., 20, Ekaterinburg, 620219, Russia; E-mail: Maria1pyshkina@gmail.com

Authors' personal contribution

Pyshkina M.D. – development of research design, formulation of scientific hypotheses, data collection and analysis, processing of the results, writing the text, designing an article for submission to the editors of the journal.

Zhukovsky M.V. – scientific management of the study, development of the design of the study.

Vasilyev A.V. – development of the study design, data collection and systematization, final editing of the article.

Ekidin A.A. – development of research design, data collection and analysis, processing of the results.

Nazarov E.I. – collection and analysis of data, processing of the results.

Romanova M.A. – research design development, data collection and analysis.

Anikin M.N. – development of the design of the study, editing the pro-intermediate version of the article.

Acknowledgment

The authors thank the referees for a thorough analysis of the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Sources of financing

This work was supported by a grant from the President of the Russian Federation (grant no. MK-4027.2021.4).

References

1. International Atomic Energy Agency (IAEA), Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purposes: IAEA Technical report series No. 403. 2001: 337.
2. Bolognese-Milsztajn T, Bartlett D, Boschung M, Coeck M, Curzio G, d'Errico F, et al. Individual neutron monitoring in workplaces with mixed neutron/photon radiation. *Radiation Protection Dosimetry*. 2004;110(1-4): 753–758. DOI:10.1093/rpd/nch220.
3. d'Errico F, Bartlett D, Bolognese-Milsztajn T, Boschung M, Coeck M, Curzio G, et al. Evaluation of individual dosimetry in mixed neutron and photon radiation fields (EVIDOS). Part I: scope and methods of the project. *Radiation Protection Dosimetry*. 2007;125(1-4): 275–280. DOI:10.1093/rpd/nch169.
4. Schuhmacher H, Bartlett D, Bolognese-Milsztajn T, Boschung M, Coeck M, Curzio G, et al. Evaluation of individual dosimetry in mixed neutron and photon radiation fields (EVIDOS). Part II: conclusions and recommendations. *Radiation Protection Dosimetry*. 2007;125(1-4): 281–284. DOI:10.1093/rpd/nch167.
5. Luszik-Bhadra M, Bolognese-Milsztajn T, Boschung M, Coeck M, Curzio G, d'Errico F, et al. Direction distributions of neutrons and reference values of the personal dose equivalent in workplace fields. *Radiation Protection Dosimetry*. 2007;125(1-4): 364–368. DOI:10.1093/rpd/nch189.
6. Luszik-Bhadra M, Lacoste V, Reginatto M, Zimbal A. Energy and direction distribution of neutrons in workplace fields: implication of the results from the EVIDOS project for the set-up of simulated workplace fields. *Radiation Protection Dosimetry*. 2007;126(1-4): 151–154. DOI:10.1093/rpd/nch032.
7. Park H, Kim J, Choi K. Neutron Spectrum Measurement at the Workplace of Nuclear Power Plant with Bonner Sphere Spectrometer. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2008;45:298–301. DOI: 10.1080/00223131.2008.10875847.

8. Luszik-Bhadra M, Bartlett D, Bolognese-Milsztajn, Boschung M, Coeck M, Curzio G, et al. Characterization of mixed neutron–photon workplace fields at nuclear facilities by spectrometry (energy and direction) within the EVIDOS project. *Radiation Protection Dosimetry*. 2007;124(3): 219–229. DOI:10.1093/rpd/nch419.
9. Fernandez F, Bakali M, Tomas M, Muller H, Pochat JL. Neutron measurements in the Vandellos II nuclear power plant with a Bonner sphere system. *Radiation Protection Dosimetry*. 2004;110(1-4): 517–521. DOI:10.1093/rpd/nch383.
10. Lacoste V, Reginatto M, Asselineau B, Muller H. Bonner sphere neutron spectrometry at nuclear workplaces in the framework of the EVIDOS project. *Radiation Protection Dosimetry*. 2007;125(1-4): P. 304–308. DOI:10.1093/rpd/nch161.
11. Luszik-Bhadra M, Derbau D, Hallfarth G, Matzke M, Wiegel B, Wittstock J. Measurement of energy and directional distribution of neutron fluence inside a nuclear power plant. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 2002;476: 457–462. DOI: 10.1016/S0168-9002(01)01490-5.
12. Alekseev AG, Kosyanenko EV, Sumaneev OV, Kryuchkov VP. Measurement of neutron radiation spectra during start-up of Unit 3 of the Kalinin NPP. *ANRI*. 2006;45(2): 55–61. (In Russian).
13. Alekseev AG, Alekseev PA. Neutron spectra at the workplaces of the Balakovo NPP personnel. *Evraziyskiy Soyuz Uchenykh. Tekhnicheskie nauki = Eurasian Union of Scientists. Technical science*. 2020;70(2): 20–26. (In Russian). DOI:10.31618/ESU.2413-9335.2020.2.70.534.
14. Pyshkina M, Vasilyev A, Ekidin A, Nazarov E, Nikitenko V, Pudovkin A. Study of neutron energy and directional distribution at the Beloyarsk NPP selected workplaces. *Nuclear Engineering and Technology*. 2020;53(5): P. 1723–1729. DOI:10.1016/j.net.2020.10.015.
15. Alekseev AG, Baranenko NN, Britvich GI, Kosyanenko EV, Pikalov VA. Investigation of the characteristics of neutron radiation at nuclear physics facilities for methodological support of the IDK. Protvino: Preprint IPhHE; 2003. 12 p. (In Russian).
16. Pyshkina MD, Vasilyev AV, Ekidin AA, Nazarov EI, Romanova MA, et al. Neutron dosimetry at workplaces of JC “Institute of Nuclear Materials”. *Radiation Hygiene*. 2021;14(2): 89–99. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-2-89-99
17. Shchurovskaya MV, Alferov VP, Geraskin NI, Radaev AI, Naymushin AG, et al. Control rod calibration simulation using Monte Carlo code for the IRT-type research reactor. *Annals of Nuclear Energy*. 2016;96: 332–343. DOI: 10.1016/j.anucene.2016.06.015
18. Chertkov YuB, Anikin MN, Lebedev II, Naymushin AG, Smolnikov NV. Calculation and Experimental Determination of the Neutronics Characteristics of the IRT-T Research Reactor. *Atomic Energy*. 2021;131(1): 43–46. DOI: 10.1007/s10512-022-00834-y
19. Goncharov VV. Research reactors. Советская атомная наука и техника/Soviet atomic science and technology: Atomizdat; 1967. 391 p.
20. Tomsk polytechnical university (TPU), Operation manual for research reactor IRT-T: TPU. 2019. Available from: https://portal.tpu.ru/SHARED/t/TAHIR/uch_rab/Tab1/%D0%98%D0%BD%D1%81%D1%82%D1%80%D1%83%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F%20%D0%BF%D0%BE%20%D1%8D%D0%BA%D1%81%D0%BF%D0%BB%D1%83%D0%B0%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%B8%20%20%D0%98.docx [Accessed 19 July 2022] (In Russian).
21. Pyshkina M, Vasilyev A, Ekidin A, Zhukovsky MV. Development and testing of a neutron radiation spectrometer in fields of radionuclide sources. *AIP Conference Proceedings*. 2019;2163(1): 1–4. DOI:10.1063/1.5130115.
22. ATOMTEX, MT AAAA.7031.004-2020 «Unfolding of neutron energy flux density distribution. Determination of average neutron flux density distribution». 2020. (In Russian).

23. Sannikov AV, Lebedev VN, Kustarev VN, Savitskaya EN, Spirov EG. Personal dosimeter of mixed radiation DVGN-01: development and investigation of its characteristics. Protvino: Preprint IPhHE; 2005. 13 p. (In Russian).
24. International Standard Organization, Radiological protection — X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy — Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence: ISO 4037-3. 2019.
25. International Standard Organization, Passive neutron dosimetry systems — Part 1: Performance and test requirements for personal dosimetry: ISO 21909. 2021.
26. Federal Medical and Biological Agency of Russia, Dosimetry. Determination of individual effective doses of neutron radiation: MU 2.6.5.052-2017. 2017.

Received: July 20, 2022

For correspondence: Mariya D. Pyshkina – Senior Lecturer, Ural Federal University; Junior Researcher, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Sofia Kovalevskaya str., 20, Ekaterinburg, 620219, Russia; E-mail: Maria1pyshkina@gmail.com)

Michael V. Zhukovsky – Chief Researcher, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

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

Aleksey A. Ekin – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Evgeniy I. Nazarov – Junior Researcher, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Marina A. Romanova – Radiation Safety Engineer, JC “Institute of Nuclear Materials”, Zarechny, Russia

Michael. N. Anikin – Head of the Nuclear Safety Service, Educational and Scientific Center “Research Nuclear Reactor”, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

For citation: Pyshkina M.D., Zhukovsky M.V., Vasilyev A.V., Ekin A.A., Nazarov E.I., Romanova M.A., Anikin M.N. Characteristics of neutron fields at pool-type research nuclear reactors”. *Radiatsionnaya Gygiena = RadiationHygiene*. 2022. Vol. 15, No. 4. P. 58-68. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-58-68

Коэффициенты перехода от индивидуального эквивалента дозы $H_p(10)$ к эффективной дозе в полях фотонного излучения и их использование при разработке моделей профессионального облучения

В.Ю. Голиков

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

В статье представлены значения коэффициентов перехода от операционной величины $H_p(10)$ к нормируемой величине — эффективной дозе. Коэффициенты перехода рассчитывались для ряда позиций индивидуальных дозиметров, расположенных на поверхности торса расчетной модели MIRD-5 тела взрослого человека. Моделируемые условия соответствовали как равномерному, так и резко неравномерному облучению работника в полях фотонного излучения с энергией от 0,04 до 2 МэВ. Было продемонстрировано, что для однородных в пространстве полей излучения и «типичном» расположении индивидуального дозиметра на теле работника отношение эффективной дозы и $H_p(10)$ меньше единицы во всем диапазоне рассматриваемых энергий фотонного излучения для направлений его падения спереди и с левого бока, т.е. $H_p(10)$ является консервативной оценкой эффективной дозы. При падении излучения сзади и «типичном» расположении индивидуального дозиметра на теле работника во всем диапазоне рассматриваемых энергий фотонного излучения отношение эффективной дозы и $H_p(10)$ существенно больше (для энергий $< 0,1$ МэВ) или близко к единице, т.е. $H_p(10)$ не является консервативной оценкой эффективной дозы. В пространственно-неоднородных полях фотонного излучения с увеличением степени неравномерности облучения тела работника значения коэффициентов перехода уменьшались. При облучении спереди и слева и размещении индивидуального дозиметра в «типичном» положении $H_p(10)$ консервативно оценивает значение эффективной дозы у работника во всем рассмотренном диапазоне энергий. При облучении справа и размещении индивидуального дозиметра в «типичном» положении значение $H_p(10)$ будет занижать эффективную дозу во всем рассмотренном диапазоне энергий. Продемонстрировано, что оптимальное расположение индивидуального дозиметра на поверхности тела работника позволяет адекватно оценивать по его показаниям значение эффективной дозы даже при существенно изменяющихся геометриях его облучения во время полного производственного цикла обращения с источником ионизирующего излучения.

Ключевые слова: операционные величины, эффективная доза, расчетная модель, коэффициенты перехода, фотонное излучение.

Введение

Нормируемые величины, эквивалентная и эффективная дозы, служащие основой для принятия мер радиационной защиты персонала [1–3], на практике не измеряемы. Поэтому их необходимо определять на основании других измеряемых величин, называемых операционными [4–7]. При контроле полей излучения на рабочих местах персонала для оценки эффективной дозы (ЭД) используют мощность амбиентного эквивалента дозы $H^*(10)$, а измерения проводят в воздухе. Для контроля индивидуального облучения используют

индивидуальные дозиметры, располагаемые на поверхности тела работника, а в качестве оценки ЭД – индивидуальный эквивалент дозы $H_p(10)$. Интерпретация результатов измерений $H^*(10)$ и $H_p(10)$ при оценке ЭД должна основываться на количественных соотношениях (коэффициентах перехода (КП)) между операционными и нормируемыми величинами, зависящих от типа поля излучения, его энергетического спектра, геометрии облучения работника, а в случае индивидуального дозиметрического контроля – и места расположения дозиметра на теле.

Голиков Владислав Юрьевич

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

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

Коэффициенты перехода от $H_p(10)$ к ЭД достаточно подробно рассмотрены в литературе для класса так называемых пространственно-инвариантных полей излучения, т.е. полей, характеристики которых не изменяются по области пространства, занимаемой человеком [8, 9]. $H_p(10)$, согласно его определению, «...на соответствующей глубине, d , под заданной точкой на поверхности тела человека» [2] в принципе может варьироваться между людьми. Более того, если значение d определено и равно 10 мм для сильно проникающего излучения, то положение дозиметра на теле не определено. Следовательно, значение $H_p(10)$ при одной и той же геометрии облучения может изменяться в зависимости от расположения дозиметра на теле работника, т.е. являться неоднозначным [9, 10]. Чтобы сделать эту величину однозначной, необходимо определить положение индивидуального дозиметра на теле работника.

Для полей фотонного излучения, изменяющих свои характеристики в области пространства, занимаемой человеком, систематических опубликованных данных о значениях КП от $H_p(10)$ к ЭД обнаружить не удалось. В реальных ситуациях с набором геометрий облучения, изменяющихся в течение всего производственного цикла обращения с техногенным источником, необходимо разрабатывать модель облучения работника, центральным звеном которой должен являться адекватный выбор оптимального (репрезентативного) места расположения индивидуального дозиметра, обеспечивающий относительную инвариантность отношения нормируемой и операционной величин для всех геометрий облучения работника.

Цель исследования – изучение поведения коэффициентов перехода от $H_p(10)$ к ЭД (Публикация №60 МКРЗ) в полях фотонного излучения с различной степенью неравномерности облучения тела человека для анализа влияния положения индивидуального дозиметра на соотношение нормируемых и операционных величин.

Материалы и методы

Значения КП оценивали расчетным путем с использованием компьютерной программы «РАДОФАН» (Расчет Доз в Фантоме) [11], позволяющей вычислять как ЭД, так и отношение ЭД/ $H_p(10)$ в 48 точках, расположенных на глубине 10 мм под поверхностью торса расчетной модели MIRD-5 тела человека различного возраста [12, 13]. Моделируемые в расчете условия облучения соответствовали как равномерному (плоскопараллельный источник) облучению тела работника с различными направлений (спереди – AP, сзади – PA и сбоку, левого – LLAT или правого – RLAT), так и резко неравномерному (точечный источник на различных расстояниях от фантома) в полях фотонного излучения с энергией от 0,04 до 2 МэВ.

В качестве данных для верификации собственных расчетов использовали результаты расчетов методом Монте-Карло значений КП от $H_p(10)$ к ЭД, заимствованных из Публикации №74 МКРЗ [9] и работы М. Zankl [14]. Последняя работа является практически единственной, обнаруженной нами, где рассчитывались соотношения между ЭД и $H_p(10)$ в различных точках на поверхности воксельного фантома взрослого человека [15] при его облучении в полях моноэнергетического фотонного из-

лучения плоскопараллельного источника. В качестве значений $H_p(10)$ в Публикации № 74 МКРЗ используют дозу, рассчитанную на глубине 10 мм в фантоме в виде прямоугольного параллелепипеда (30 см × 30 см × 15 см) из тканезквивалентного материала. В работе М. Zankl и в настоящем исследовании в качестве значений $H_p(10)$ использовали расчеты доз на глубине 10 мм в разных локациях на поверхности торса расчетной модели, имеющей кривизну и зоны гетерогенности (легкие с меньшей плотностью, чем мягкие ткани). Там, где не отмечено иное, в качестве $H_p(10)$ использовали «показания» индивидуального дозиметра, расположенного в типичной локации на передней поверхности торса работника, – 14 см ниже щитовидной железы со смещением влево на 8 см (рис. 1).



Рис. 1. Типичное расположение индивидуального дозиметра на поверхности тела работника
 [Fig. 1. A typical location of an individual dosimeter on the surface of the employee's body]

Кроме того, для валидации расчетов в условиях неравномерного облучения работника использовали результаты собственных фантомных экспериментов с точечным источником радионуклида ^{60}Co , располагавшимся на расстояниях 20 см, 50 см, 100 см и 250 см от поверхности физического фантома Alderson Rando [16], аналогичного по своим антропометрическим характеристикам расчетной модели. Измерения, техника выполнения которых была неоднократно описана нами ранее [17–19], выполнялись с помощью термолюминесцентных детекторов. Погрешность определения доз не превышала $\pm 10\%$ при доверительной вероятности 95%.

Результаты и обсуждение

Плоскопараллельные источники (равномерное облучение поверхности тела)

На рисунках 2 и 3 представлены результаты расчетов зависимости отношения ЭД/ $H_p(10)$ от энергии фотонов плоскопараллельного источника с направлениями падения излучения на расчетную модель AP и LLAT и PA соответственно. Представлены результаты собственных расчетов в сравнении с данными, заимствованными из Публикации № 74 МКРЗ [9] и работы М. Zankl [14]. Результаты расчетов из Публикации № 74 МКРЗ и из работы М. Zankl, полученные с помощью метода Монте-Карло, могут считаться эталонными.

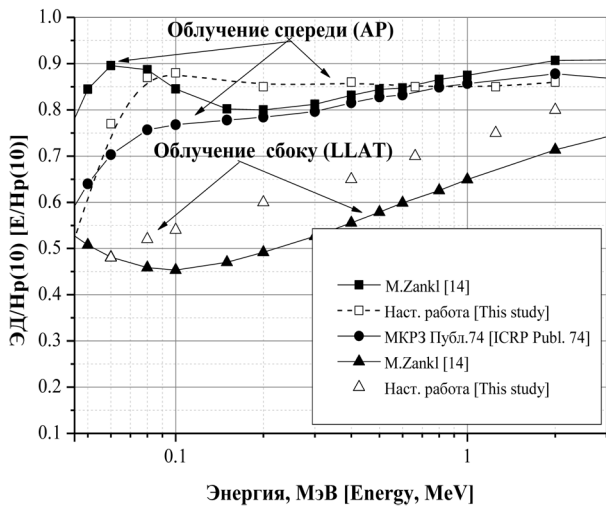


Рис. 2. Зависимость отношения ЭД/ $H_p(10)$ от энергии фотонов плоскопараллельного источника с направлениями падения излучения на расчетную модель AP и LLAT

[Fig. 2. Dependence of the $E/H_p(10)$ ratio on the photon energy of a plane-parallel source with directions of radiation incidence to the computational model AP and LLAT]

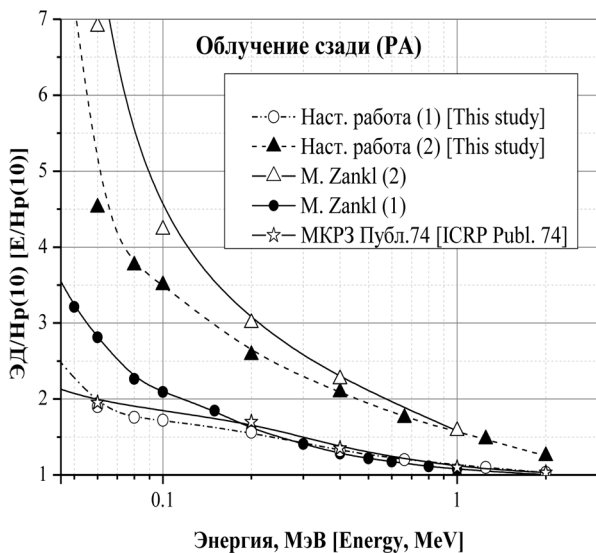


Рис. 3. Зависимость отношения ЭД/ $H_p(10)$ от энергии фотонов плоскопараллельного источника с направлением падения излучения сзади (РА) на расчетную модель. Цифра (1) соответствует «показаниям» дозиметра, расположенного в типичной локации (на уровне легких), а цифра (2) – «показаниям» дозиметра, расположенного на 40 см ниже (на уровне живота)

[Fig. 3. Dependence of the $E/H_p(10)$ ratio on the photon energy of a plane-parallel source with directions of radiation incidence to the computational model from the back (PA). The number (1) corresponds to the “readings” of the dosimeter located in a typical location (at the level of the lungs) and the number (2) is “readings” of the dosimeter located 40 cm lower (at the level of the abdomen)]

Для более осмысленного сравнения результатов расчетов из различных литературных источников между собой укажем на то, что значения ЭД из Публикации № 74 МКРЗ и при выполнении собственных расчетов с помо-

щью компьютерной программы «РАДОФАН» [11] соответствовали расчетной модели тела человека MIRD-5, а из работы М. Zankl – воксельному фантому взрослого мужчины «Golem» [15], прототипу расчетной модели Reference Male [20]. Кроме того, компьютерная программа «РАДОФАН», применявшаяся для расчетов ЭД в настоящем исследовании, использует многогрупповое приближение в описании спектра фотонного излучения, вместо моноэнергетических фотонов, использовавшихся при расчетах КП методом Монте-Карло для Публикации №74 МКРЗ и в работе М. Zankl. Последнее обстоятельство обуславливает дополнительную погрешность результатов собственных расчетов, особенно в области малых энергий излучения ($< 0,06$ МэВ).

С учетом вышеизложенного, отметим, что результаты расчета отношения ЭД/ $H_p(10)$, выполненные в настоящем исследовании для энергий фотонного излучения выше 0,06 МэВ, отличаются от аналогичных результатов из Публикации №74 МКРЗ и работы [14] не более чем на 20%. Для энергии излучения 0,04 МэВ эти различия увеличиваются до 30–40% по причинам, указанным выше.

Для направлений падений излучения AP и LLAT и «типичном» расположении индивидуального дозиметра на теле работника отношение ЭД/ $H_p(10)$ меньше единицы во всем диапазоне рассматриваемых энергий фотонного излучения, т.е. $H_p(10)$ является консервативной оценкой ЭД.

При падении излучения сзади и типичном расположении индивидуального дозиметра на теле работника (т.е. спереди) во всем диапазоне рассматриваемых энергий фотонного излучения отношение ЭД/ $H_p(10)$ существенно больше (для энергий $< 0,1$ МэВ) или близко к единице, т.е. $H_p(10)$ не является консервативной оценкой ЭД. При этом степень недооценки ЭД по показаниям индивидуального дозиметра зависит от его положения на теле работника. Так, например, для энергии фотонов 0,1 МэВ отношение ЭД/ $H_p(10) \sim 2$ для дозиметра, расположенного в типичной локации (на уровне легких с плотностью, меньшей, чем у мягких тканей), а для дозиметра, расположенного ниже на 40 см (на уровне мягких тканей брюшной полости), ЭД/ $H_p(10) \sim 4$. Однако эта проблема может быть разрешима путем правильного расположения дозиметра (дозиметров) на теле работника после предварительного изучения характеристик полей излучения на его рабочем месте (см. также ниже).

Точечные источники на конечном расстоянии от поверхности тела (неравномерное облучение)

Достаточно часто персонал при работе с источниками фотонного излучения подвергается неравномерному облучению (персонал, занятый неразрушающим контролем оборудования, различные категории медицинского персонала). Для таких условий облучения человека нам не удалось обнаружить систематических данных о соотношении ЭД/ $H_p(10)$, чтобы оценить, являются ли в этом случае показания индивидуального дозиметра консервативной оценкой ЭД.

Для этих условий облучения мы ограничились рассмотрением следующих геометрий облучения AP, LLAT и RLAT, т.к. маловероятны штатные (неаварийные) условия работы с источниками излучения при геометрии облучения PA, особенно на малых расстояниях от тела. Результаты рас-

четов значений КП от $H_p(10)$ к эффективной дозе (отношения $E/H_p(10)$) с помощью компьютерной программы «РАДОФАН» для типичного положения индивидуального дозиметра на теле работника представлены на рисунках 4–6 для облучения спереди, справа и слева соответственно. На рисунке 4 также представлены результаты фантомного эксперимента с точечным источником радионуклида ^{60}Co , располагавшимся спереди на расстояниях 20 см, 50 см, 100 см и 250 см от поверхности физического фантома Alderson Rando, аналогичного по своим антропометрическим характеристикам расчетной модели.

Результаты расчетов и эксперимента свидетельствуют о следующем:

1. Сравнение расчетных значений коэффициента перехода с результатами измерений, полученных с помощью фантомного эксперимента, показало хорошее согласие обоих наборов данных. Максимальное относительное отличие расчетного результата от результата измерений составило 18% при расстоянии $R=20$ см, а в остальных случаях оно не превышало 10%.

2. С уменьшением расстояния от источника излучения до поверхности тела (увеличением неравномерности облучения) значение КП уменьшается.

3. При облучении AP и LLAT $H_p(10)$ у индивидуального дозиметра, размещенного в типичном положении, консервативно оценивают значение эффективной дозы у работника во всем рассмотренном диапазоне энергий.

4. При облучении RLAT $H_p(10)$ у индивидуального дозиметра, размещенного в типичном положении, будут занижать значение эффективной дозы во всем рассмотренном диапазоне энергий. Таким образом, как и в случае облучения работника сзади, возникает необходимость в репрезентативном расположении индивидуального дозиметра на поверхности тела.

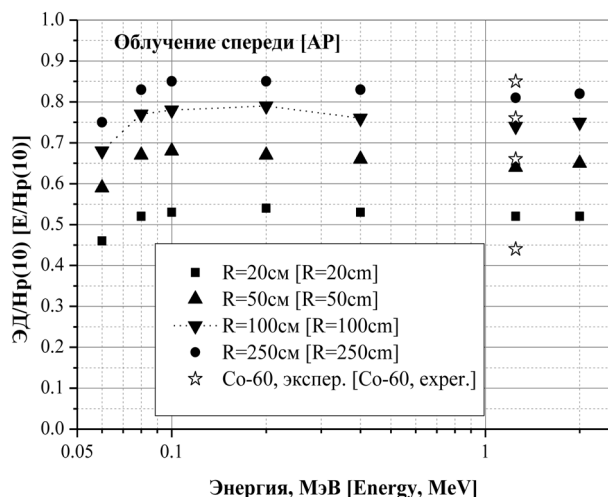


Рис. 4. Зависимость отношения $E/H_p(10)$ от энергии фотонов точечного источника, расположенного спереди на различных расстояниях R от поверхности тела работника
[Fig. 4. Dependence of the $E/H_p(10)$ ratio on the photon energy of a point source located in front at different distances R from the surface of the employee's body]

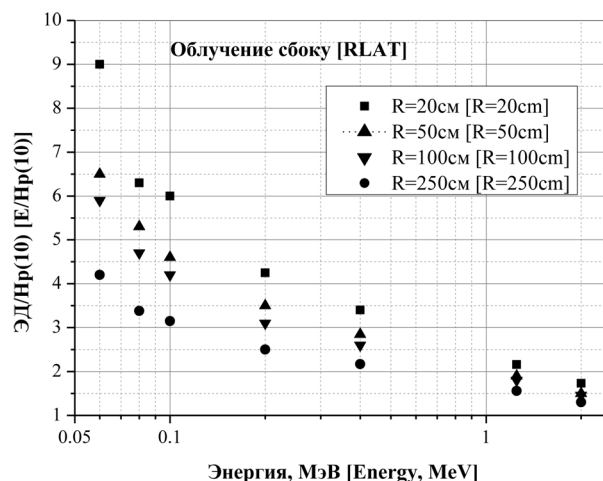


Рис. 5. Зависимость отношения $E/H_p(10)$ от энергии фотонов точечного источника, расположенного RLAT на различных расстояниях R от поверхности тела работника
[Fig. 5. Dependence of the $E/H_p(10)$ ratio on the photon energy of a point source located RLAT at different distances R from the surface of the employee's body]

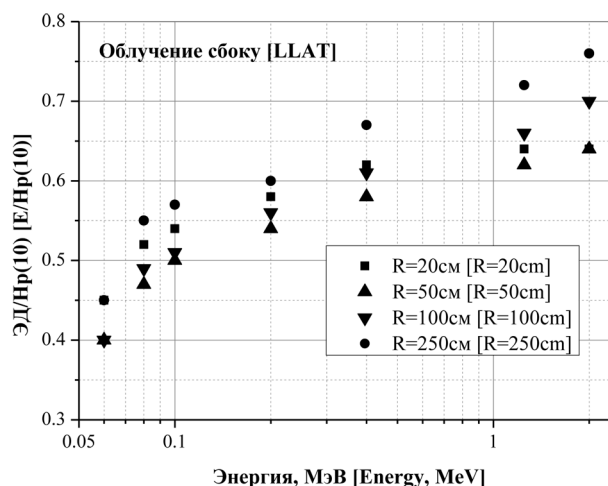


Рис. 6. Зависимость отношения $E/H_p(10)$ от энергии фотонов точечного источника, расположенного LLAT на различных расстояниях R от поверхности тела работника
[Fig. 6. Dependence of the $E/H_p(10)$ ratio on the photon energy of a point source located LLAT at different distances R from the surface of the employee's body]

Пример выбора положения дозиметра на теле работника при построении модели профессионального облучения

В процессе использования источников ионизирующего излучения в производственной деятельности представители той или иной категории персонала могут облучаться последовательно в разных геометриях, для которых, как было продемонстрировано выше, значения КП от $H_p(10)$ к эффективной дозе могут существенно раз-

личаться. Однако в конце периода контроля мы измеряем интегральное значение $H_p(10)$, и непонятно, какое значение КП использовать для оценки ЭД. Решением этой проблемы могло бы стать расположение индивидуального дозиметра на поверхности тела работника в таком месте, где значения КП были бы приблизительно одинаковы в разных геометриях облучения во время всего производственного цикла обращения с источником ионизирующего излучения.

Поясним это на следующем примере. Рассмотрим условия облучения медицинского персонала, работающего с радиофармацевтическими препаратами (РФП) на основе радионуклида ^{131}I в отделениях радионуклидной терапии. В этом случае можно выделить следующие ситуации облучения [21] (рис. 7):

1. Перенос флаконов с РФП в защитных контейнерах (рис. 7А) к месту заправки шприца (вытяжной шкаф).
2. Фасовка РФП в шприцы у защитного шкафа (рис. 7Б).
3. Транспортировка в защитном контейнере шприцов к капельнице (рис. 7А).
4. Введение РФП из шприца в капельницу (рис. 7В).

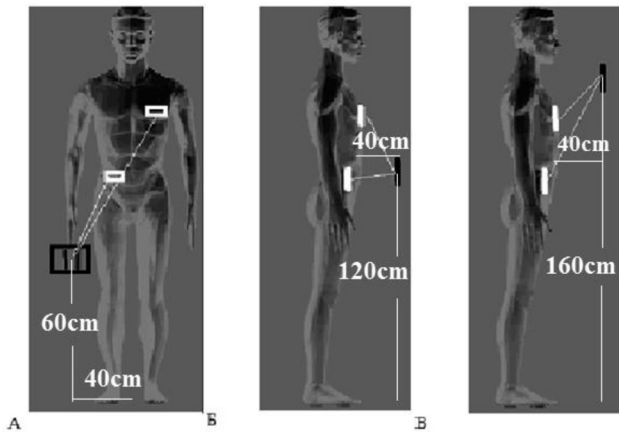


Рис. 7. Геометрия облучения медицинского персонала при выполнении отдельных операций с РФП в отделениях радионуклидной терапии. Белыми прямоугольниками показаны положения индивидуальных дозиметров, черными – контейнеры или флаконы с РФП

[Fig. 7. The geometry of medical staff irradiation during performing separate operations with the activity in radionuclide therapy departments. White rectangles indicate locations of the individual dosimeters, black – containers or flacons with the activity]

На основании данных о взаимном расположении источника ^{131}I (Еср. ~ 0,4 МэВ) по отношению к работнику [21] с помощью компьютерной программы «РАДОФАН» были рассчитаны следующие значения КП от $H_p(10)$ к ЭД:

При типичном расположении индивидуального дозиметра:

- для операций (1) и (3) ЭД/ $H_p(10)$ =35 при переноске контейнера правой рукой и ЭД/ $H_p(10)$ =2,3 при переноске контейнера левой рукой;
- для операции (2) ЭД/ $H_p(10)$ =0,58;
- для операции (4) ЭД/ $H_p(10)$ =0,41.

При оптимальном расположении индивидуального дозиметра справа на уровне талии и переноске контейнера правой рукой:

- для операций (1) и (3) ЭД/ $H_p(10)$ =0,61;
- для операции (2) ЭД/ $H_p(10)$ =0,54;
- для операции (4) ЭД/ $H_p(10)$ =0,92.

Приведенные выше данные свидетельствуют о том, что в первом случае при типичном, но не оптимальном расположении индивидуального дозиметра разброс значений КП для отдельных операций с источником составляет от 5 раз до более чем 50 раз в зависимости от того, с какой стороны тела выполняется операция переноски контейнера с РФП. Во втором же случае при оптимальном расположении индивидуального дозиметра (справа на уровне талии) разброс значений КП для отдельных операций с источником составляет менее 2 раз, что позволяет с небольшой степенью консерватизма для оценки ЭД использовать максимальное значение КП. Таким образом, оптимальное (репрезентативное) расположение индивидуального дозиметра на теле работника будет обеспечивать вполне адекватную оценку значения ЭД за весь производственный цикл.

Заключение

В статье представлены значения коэффициентов перехода от операционной величины $H_p(10)$ к эффективной дозе. Моделируемые условия облучения соответствовали как равномерному (плоскопараллельный источник), так и резко неравномерному (точечный источник на разных расстояниях от фантома) облучению работника в полях фотонного излучения с энергией от 0,04 до 2 МэВ. Коэффициенты перехода рассчитывались для ряда положений индивидуального дозиметра на поверхности торса расчетной модели тела взрослого человека MIRД-5.

Было продемонстрировано, что для однородных в пространстве полей излучения, направлений падения излучения спереди и сбоку (LLAT) и типичном расположении индивидуального дозиметра на теле работника отношение ЭД/ $H_p(10)$ меньше единицы во всем диапазоне рассматриваемых энергий фотонного излучения, т.е. $H_p(10)$ является консервативной оценкой ЭД. При падении излучения сзади и типичном расположении индивидуального дозиметра на теле работника во всем диапазоне рассматриваемых энергий фотонного излучения отношение ЭД/ $H_p(10)$ существенно больше (для энергий < 0,1 МэВ) или близко к единице, т.е. $H_p(10)$ не является консервативной оценкой ЭД.

В пространственно-неоднородных полях фотонного излучения с увеличением степени неравномерности облучения тела работника значения КП уменьшаются. При облучении спереди и слева значения $H_p(10)$ для индивидуального дозиметра, размещенного в типичном положении, консервативно оценивают значение эффективной дозы у работника во всем рассмотренном диапазоне энергий. При облучении справа значения $H_p(10)$ для индивидуального дозиметра, размещенного в типичном положении, будут занижать значение эффективной дозы во всем рассмотренном диапазоне энергий.

На примере персонала отделений ядерной медицины было продемонстрировано, что оптимальное (репрезентативное) расположение индивидуального дозиметра на поверхности тела работника позволяет адекватно оценивать по его показаниям значение ЭД даже при существенно изменяющихся геометриях облучения во время полного производственного цикла обращения с источником ионизирующего излучения.

Информация о конфликте интересов

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

Литература

1. International Commission on Radiological Protection. (1990) 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60 Ann. ICRP 21 (1-3) 1-201.
2. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер с англ. / Под общ. ред. М.Ф. Киселёва и Н.К. Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009.
3. «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)». Санитарные правила и нормативы (СанПиН 2.6.1.2523-09): утв. и введены в действие от 07.07.09 г. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
4. ICRU, 1988. Measurement of dose equivalents from external radiation sources, Part 2. ICRU Report 43. ICRU Publications: Bethesda, MD.
5. ICRU, 1993b. Quantities and units in radiation protection dosimetry. ICRU Report ICRU Publications: Bethesda, MD. ICRU, 1997. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD.
6. ICRU, 1998. Fundamental quantities and units for ionizing radiation. ICRU Report 60. ICRU Publications: Bethesda, MD.
7. ICRU, 2001b. Determination of operational dose equivalent quantities for neutrons. ICRU Report 66 // Journal of ICRU 1 (3).
8. ICRP 2010 Conversion coefficients for radiological protection quantities for external radiation exposures Publication 116 40 (2–5) (London: Elsevier).
9. International Commission on Radiological Protection. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. Oxford, UK Pergamon Press; ICRP Publication 74; Ann. ICRP. 1996. Vol. 26, No 3/4. P. 1-205.
10. Wagner S.R. The definition of the individual dose equivalent // Radiation Protection Dosimetry. 1987. Vol. 20. P. 271-273.
11. Голиков В.Ю. Метод и компьютерная программа расчета доз фотонного излучения в фантомах тела человека // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2. С. 55-65.
12. Snyder W.S., Ford M.R., Warner G.G., Watson G.G. Revision of MIRD Pamphlet No 5 Entitled 'Estimates of absorbed fractions for monoenergetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom' ORNL-4979. Tennessee: Oak Ridge National Laboratory; 1974.
13. Han E.Y., Bolch W.E., Eckerman K.F. Revisions to the ORNL series of adult and pediatric computational phantoms for use with the MIRD schema // Health Physics. 2006. Vol. 90, No 4. P. 337–356.
14. Zankl M. Personal dose equivalent for photons and its variation with dosimeter position // Health Physics. 1999. Vol. 76, No 2. P. 162-170.
15. Zankl M., Petoussi-Henß N., Wittmann A. The GSF voxel phantoms and their application in radiology and radiation protection. In: Proceedings of a Workshop on Voxel Phantom Development, 6-7 July 1995. Chilton, UK: National Radiological Protection Board. 1996. P. 98-104.
16. Alderson S.W., Lanzl L.H., Rollins M., Spira I. An instrumented phantom system for analog computation of treatment plans // American Journal of Roentgenology. 1962. No. 87. P. 185.
17. Golikov V.Yu., Nikitin V.V. Estimation of mean organ doses and effective dose equivalent from Rando Phantom measurements // Health Physics. 1989. Vol. 56, No 1. P. 111–115.
18. Golikov V., Wallström E., Wöhni T. et al. Evaluation of conversion coefficients from measurable to risk quantities for external exposure over contaminated soil by use of physical human phantoms // Radiation Environmental Biophysics. 2007. Vol. 46, No 4. P. 375-382.
19. Golikov V., Barkovsky A., Wallström E., Cederblad Å. A comparative study of organ doses assessment for patients undergoing conventional X-ray examinations: phantom experiments vs. calculations // Radiation Protection Dosimetry. 2018. Vol. 178, No 2. P. 223–234.
20. ICRP, 2009. Adult reference computational phantoms. ICRP Publication 110. Ann. ICRP 39(2).
21. Голиков В.Ю., Чипига Л.А., Водоватов А.В., Смолярчук М.Я. Некоторые аспекты радиационной защиты в отделениях радионуклидной терапии // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, №1. С. 75-85.

Поступила: 25.07.2022 г.

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

Для цитирования: Голиков В.Ю. Коэффициенты перехода от показаний индивидуальных дозиметров к эффективной дозе в полях фотонного излучения и их использование при разработке моделей профессионального облучения // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 69-76. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-69-76

The conversion coefficients from $H_p(10)$ to effective dose in the fields of photon radiation and their use in the development of occupational exposure models

Vladislav Yu. Golikov

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 paper presents the values of the conversion coefficients from the operational quantity, $H_p(10)$ to the protection quantity, effective dose (E). The conversion coefficients were calculated in a number of points located at a depth of 10 mm under the surface of the torso of the computational model MIRD-5 of the body of an adult. The simulated irradiation conditions corresponded to both uniform and sharply non-uniform irradiation of the employee in the fields of photon radiation with the energy from 0.04 to 2 MeV. It was demonstrated that for the uniform radiation and the "typical" location of the individual dosimeter on the employee's body, the $E/H_p(10)$ ratio is less than one in the entire range of radiation energies for the directions of its incidence in front and from the left side, i.e. $H_p(10)$ is a conservative assessment of E . When the radiation falls on the back and for the "typical" location of an individual dosimeter on the employee's body in the entire range of radiation energies, the ratio $E/H_p(10)$ is significantly larger (for the energies <0.1 MeV) or close to one, i.e. $H_p(10)$ is not a conservative assessment of E . In the spatial non-uniform fields of photon radiation with an increase in the degree of non-uniformity irradiation of the employee's body, the values of the conversion coefficients decreased. When irradiation in front and from the left side an individual dosimeter placed in a "typical" position will be conservative estimate the value of an effective dose of the employee in the entire considered range of energies. When irradiation on the right side an individual dosimeter placed in a "typical" position will underestimate the value of an effective dose in the entire considered range of energy. It was demonstrated that the optimal location of the individual dosimeter on the surface of the employee's body allows us to adequately assess according to his indications the value of an effective dose even with significantly changing geometry of its irradiation during a complete cycle of treatment with the source of ionizing radiation.

Key words: operational quantity, effective dose, computational model, conversion coefficient, photons.

Conflict of interest

The author declares the absence of a conflict of interests during performing the work and preparing this paper.

References

1. International Commission on Radiological Protection. (1990) Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60 Ann. ICRP. 1990;21(1-3): 1-201.
2. International Commission on Radiological Protection 2007 The Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 Ann. ICRP. 2007;37: 1-332.
3. Sanitary rules and norms. SanPiN 2.6.1.2523-09. Norms of the radiation safety (NRB 99/2009). Registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation 14.08.2009 N 14534. (In Russian).
4. ICRU, 1988. Measurement of dose equivalents from external radiation sources, Part 2. ICRU Report 43. ICRU Publications: Bethesda, MD.
5. ICRU, 1993b. Quantities and units in radiation protection dosimetry. ICRU Report ICRU Publications: Bethesda, MD. ICRU, 1997. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD.
6. ICRU, 1998. Fundamental quantities and units for ionizing radiation. ICRU Report 60. ICRU Publications: Bethesda, MD.
7. ICRU, 2001b. Determination of operational dose equivalent quantities for neutrons. ICRU Report 66. *Journal of ICRU*. 1 (3).
8. ICRP 2010 Conversion coefficients for radiological protection quantities for external radiation exposures Publication 116 40 (2-5) (London: Elsevier).
9. International Commission on Radiological Protection. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. Oxford, UK Pergamon Press; ICRP Publication 74; Ann. ICRP. 1996;26(3/4): 1-205.
10. Wagner SR. The definition of the individual dose equivalent. *Radiation Protection Dosimetry*. 1987;20: 271-273.
11. Golikov VYu. Method and software for photon dose calculation in phantoms of human body. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2): 55-65. (In Russian).
12. Snyder WS, Ford MR, Warner GG, Watson GG. Revision of MIRD Pamphlet No 5 Entitled 'Estimates of absorbed fractions for monoenergetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom' ORNL-4979. Tennessee: Oak Ridge National Laboratory; 1974.
13. Han EY, Bolch WE, Eckerman KF. Revisions to the ORNL series of adult and pediatric computational phantoms for use with the MIRD schema. *Health Physics*. 2006; 90(4):337-356.
14. Zankl M. Personal dose equivalent for photons and its variation with dosimeter position. *Health Physics*. 1999;76(2): 162-170.

Vladislav Yu. Golikov

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

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

15. Zankl M, Petoussi-Henß N, Wittmann A. The GSF voxel phantoms and their application in radiology and radiation protection. In: Proceedings of a Workshop on Voxel Phantom Development, 6-7 July 1995. Chilton, UK: National Radiological Protection Board. 1996: 98-104.
16. Alderson SW, Lanzi LH, Rollins M, Spira I. An instrumented phantom system for analog computation of treatment plans. *American Journal of Roentgenology*. 1962;87: 185.
17. Golikov VY, and Nikitin VV. Estimation of mean organ doses and effective dose equivalent from Rando Phantom measurements. *Health Physics*. 1989;56(1): 111–115.
18. Golikov V, Wallström E, Wöhni T, Tanaka K, Endo S, Hoshi M. Evaluation of conversion coefficients from measurable to risk quantities for external exposure over contaminated soil by use of physical human phantoms. *Radiation Environ. Biophysics*. 2007;46(4): 375-382.
19. Golikov V, Barkovsky A, Wallström E, Cederblad Å. A comparative study of organ doses assessment for patients undergoing conventional X-ray examinations: phantom experiments vs. calculations. *Radiation Protection Dosimetry*. 2018;178(2): 223–234.
20. ICRP, 2009. Adult reference computational phantoms. ICRP Publication 110. Ann. ICRP 39(2).
21. Golikov VYu, Chipiga LA, Vodovatov AV, Smolyarchuk MYa. Some aspects of radiation protection in radionuclide therapy departments. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(1): 75-85. (In Russian).

Received: July 25, 2022

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

For citation: Golikov V.Yu. The conversion coefficients from Hp(10) to effective dose in the fields of photon radiation and their use in the development of occupational exposure models. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 4, P. 69-76. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-69-76

Оценка применимости метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой для задач специального индивидуального дозиметрического контроля

В.Р. Баталов, А.Б. Соколова, А.В. Ефимов, А.Б. Джунушалиев

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

В условиях современного радиационно опасного производства повышенные уровни внутреннего облучения персонала обусловлены в основном поступлением радионуклидов в ситуациях, вызванных неисправностью оборудования или неправильными действиями персонала, что может приводить или приводит к облучению выше установленных норм. В таких случаях для определения величины поступления и оценки ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения собирается суточное количество мочи и/или кала, далее следует подготовка счетных образцов и их последующее измерение. В совокупности продолжительность получения результата составляет от 3 до 8 дней в зависимости от метода измерения. В случае острого поступления плутония важно как можно быстрее оценить уровни поступления нуклида в организм, чтобы принять решение о тактике лечения и снижения дозовых нагрузок. Для достижения вышеуказанной цели в Южно-Уральском институте биофизики была разработана методика измерения активности плутония-239 в крови с применением масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой, так как в первые часы и сутки после поступления (ингаляционного или через поврежденные кожные покровы) концентрация радионуклида в крови находится на максимальном уровне. Также разработан метод измерения плутония в аликвоте мочи с использованием масс-спектрометра для выполнения специального индивидуального дозиметрического контроля, практически не требующий пробоподготовки, что позволяет получить оценку поступления в течение нескольких часов. Показано, что в зависимости от пути поступления и химической формы поступающих соединений плутония измерение активности плутония в крови и аликвоте мочи методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой позволяет определять от 0,1 до 47% от предела поступления в течение первых суток после события. Анализ пробы крови занимает от 1 до 1,5 рабочих дней против недели для анализа пробы мочи альфа-спектрометрическим методом. Применение разработанной методики, помимо целей индивидуального дозиметрического контроля, позволит получить новую информацию о влиянии хелатотерапии на поведение плутония в организме человека.

Ключевые слова: масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой, плутоний, кровь, моча, дозиметрия внутреннего облучения.

Введение

Обеспечение достоверной информацией об индивидуальных дозах внутреннего облучения персонала, обусловленного инкорпорированным плутонием, является одной из основных задач внутренней дозиметрии. В связи с совершенствованием средств индивидуальной защиты и улучшением производственных условий повышенные уровни внутреннего облучения персонала обусловлены в основном однократными поступлениями (далее острым поступлением) в ситуациях, вызванных неисправностью оборудования, неправильными действиями персонала и т.п., что может приводить или приводит к облучению выше установленных норм (далее нештатные ситуации) [1]. Классические методы дозиметрии внутреннего облу-

чения, обусловленного поступлением плутония, в России и в мире основаны на интерпретации результатов измерений активности радионуклида в теле человека, органе или ткани и/или в биологических образцах [2].

В настоящее время основными методами измерения активности плутония в биологических пробах являются альфа-радиометрический и альфа-спектрометрический методы. Недостатками радиометрического метода являются худший предел обнаружения относительно других методов и возможность определения только суммарной альфа-активности изотопов плутония $^{238,239+240}\text{Pu}$. К недостаткам метода альфа-спектрометрии следует отнести необходимость долгой радиохимической подготовки и длительное время измерения образцов. В последние годы в качестве

Баталов Вадим Робертович

Южно-Уральский институт биофизики

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

метода измерения активности радионуклидов в биосубстратах все большее распространение находит метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС), который обладает значительно лучшими пределами обнаружения для многих элементов. К примеру, измерение различных элементов (особенно токсичных металлов) методом ИСП-МС в крови широко распространено благодаря высокой чувствительности метода и возможности одновременного измерения десятков элементов [3–7]. В ЮУриБФ при выполнении специального (аварийного) индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) на определенных этапах используются все 3 метода. Сравнительная характеристика методов приведена в таблице 1.

В случае острого поступления плутония (как ингаляционного, так и через поврежденные покровы кожи) важно как можно быстрее оценить уровни поступления нуклида в организм. Для этого целесообразно анализировать

аликвоту крови, так как в первые сутки после острого поступления в крови содержится более 90% системной активности. Возможность быстрого отбора аликвоты крови (в отличие от сбора суточного количества мочи) позволяет в кратчайшие сроки оценить уровни поступления плутония в организм и своевременно провести необходимые медицинские мероприятия.

Для измерения активности плутония в крови в ЮУриБФ была разработана и аттестована методика измерений¹ (МИ), которая позволяет в том числе измерять содержание ²³⁹Pu в аликвоте крови. Несомненным плюсом данного метода является возможность отбора крови в любой момент, что избавляет от необходимости ожидания сбора суточных порций мочи или кала. В настоящее время в доступных литературных источниках отсутствуют сведения об использовании метода ИСП-МС при проведении аварийного ИДК; в работе [8] авторы используют

Таблица 1

Сравнительная характеристика методов анализа активности плутония в биосубстратах

[Table 1

Comparative characteristics of the methods of plutonium activity analysis in biosubstrates]

Метод анализа [Method of analysis]	Биосубстрат [Biosubstrate]	Предел обнаружения [Detection limit]	Время подготовки и измерений [Preparation and measurement duration]	Недостатки метода [Method's disadvantages]
Альфа-радиометрия [Alpha radiometry]	Аликвота мочи, 200 мл [Urine aliquot, 200 ml]	8,1 мБк-проба ⁻¹ (~65 мБк·сут ⁻¹) [8.1 mBq·sample ⁻¹ (~65 mBq·d ⁻¹)]	3–4 дня [3–4 days]	Определение суммарной альфа-активности, высокий предел обнаружения [Determination of total alpha activity, high detection limit]
Альфа-спектрометрия [Alpha spectrometry]	СКМ (б/п)* [Daily urine (non-DTPA)*]	1 мБк·сут ⁻¹ [1 mBq·d ⁻¹]	Неделя [a week]	Долгое время пробоподготовки и измерений [Long time of sample preparation and measurement]
	Аликвота мочи, 200 мл [Urine aliquot, 200 ml]	2,8 мБк-проба ⁻¹ (~22 мБк·сут ⁻¹) [2.8 mBq·sample ⁻¹ (~22 mBq·d ⁻¹)]		
ИСП-МС [ICP-MS]	СКМ (б/п)* [Daily urine (non-DTPA)*]	0,1 мБк·сут ⁻¹ [0.1 mBq·d ⁻¹]	3 дня [3 days]	Невозможность определения ²³⁸ Pu** [No possibility to determine ²³⁸ Pu]**
	Аликвота мочи, 5 мл [Urine aliquot, 5 ml]	0,1 мБк-проба ⁻¹ (~32 мБк·сут ⁻¹) [0.1 mBq·sample ⁻¹ (~32 mBq·d ⁻¹)]	3–4 ч [3-4 hours]	
	Аликвота крови, 10 мл [Blood aliquot, 10 ml]	0,1 мБк-проба ⁻¹ [0.1 mBq·sample ⁻¹]	1–1,5 дня [1-1.5 days]	

* – суточное количество мочи (далее СКМ) (берется в анализ в случаях без введения пентацина) [daily amount of urine (hereinafter 24-hour urine) is collected for analysis in cases with no DTPA administration]

** – невозможность определения ²³⁸Pu методом ИСП-МС обуславливается 2 причинами: интерференцией на аналитической массе 238 с природным ²³⁸U, присутствующим повсеместно, и небольшим периодом полураспада ²³⁸Pu по сравнению с другими изотопами плутония [the impossibility of determination of ²³⁸Pu by ICP-MS is due to two reasons: interference on the analytical mass of 238 with presented everywhere natural ²³⁸U and a short half-life of ²³⁸Pu compared to other plutonium isotopes]

¹ СП-21-3-2021 «Методика измерений активности изотопов плутония-239,240 и изотопов урана-235,238 в биологических пробах методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой». Свидетельство об аттестации № СП-21-3-РА.RU.311952-2021, выдано ФГУП РФЯЦ ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина. Озерск, 2021. 38 с. [Company-specific Standard]-21-3-2021. Measurement technique for plutonium-239, 240 and uranium-235, 238 isotopes in biological samples using mass spectrometry with inductively-coupled plasma. Calibration certificate No. СП-21-3-РА.RU.311952-2021 issued by FSUE Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics. Ozersk; 2021. 38 p. (In Russ.)]

экспрессный рентгенофлуоресцентный анализ для определения плутония в крови, однако предел обнаружения данного метода в ~14 000 раз выше, чем у ИСП-МС, что позволяет использовать его только в случаях поступления сотен и тысяч ПГП.

В случае применения препаратов, ускоряющих выведение плутония (пентацин), метод ИСП-МС позволяет анализировать минимальную аликвоту мочи (до 5 мл) с минимальной пробоподготовкой без анионообменного разделения. Небольшое количество естественного урана в такой аликвоте не создает значительных интерференций на аналитической массе ^{239}Pu , что позволяет очень быстро получить результат оценки поступления ^{239}Pu (в течение 3–4 ч после отбора пробы).

Цель исследования – изучение возможностей метода ИСП-МС для измерения активности плутония в крови и моче у работников, вовлеченных в нештатные ситуации, для получения экспресс-оценки поступления.

Задачи исследования

1. Анализ используемых методов для внутренней дозиметрии плутония.
2. Разработка методики измерений активности плутония с помощью ИСП-МС.
3. Исследование метрологических характеристик метода.
4. Оценка возможностей применения ИСП-МС в аварийных ситуациях.

Материалы и методы

Масс-спектрометрия – это физический метод измерения отношения массы заряженных частиц (ионов) к их заряду. Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой основана на использовании индуктивно связанной плазмы в качестве средства ионизации [9] и масс-спектрометра для разделения и детектирования ионов. Метод также позволяет проводить изотопный анализ выбранных элементов, сортирует изотопы в зависимости от отношения их массы к заряду (m/z), т.е. активность определяется по числу атомов в образце, а не по радиоактивности. В данной работе для измерений используется масс-спектрометр Agilent 8800 Triple Quad.

Измерение малых уровней активности изотопов плутония в присутствии большого количества посторонних актинидов может быть также связано с трудностью из-за спектральной интерференции гидридных ионов и хвостов от пиков соседних изотопов актинидов [10]. К примеру, точность измерения низких уровней ^{239}Pu снижается из-за мешающих ионов ^{238}U и от влияния пика от повсеместно распространенного естественного ^{238}U . Чтобы свести к минимуму эти помехи, требуется максимально полное удаление урана из образцов и применение технологии динамической реакционной ячейки [11]. Как правило, при подготовке образцов биосубстратов для масс-спектрометрических измерений используются методы предварительного концентрирования – выделение плутония из матрицы мочи методом анионообменной или экстракционной хроматографии, которые позволяют одновременное разделение ^{235}U , ^{237}Np , ^{238}U , ^{239}Pu и ^{240}Pu [12, 13].

Метод измерения ИСП-МС обладает лучшим пределом обнаружения для долгоживущих изотопов, что позво-

ляет уменьшить нижнюю границу диапазона измерений ^{239}Pu в биосубстратах практически на порядок по сравнению с альфа-спектрометрическим методом анализа. К тому же для альфа-спектрометрии требуется длительный набор статистики счета (3–5 дней для детектирования на уровне НПДИ), в то время как среднее время измерения пробы с использованием ИСП-МС составляет менее 5 минут. К недостаткам метода можно отнести невозможность измерений ^{238}Pu , который также может поступать в организм человека в условиях радиационно опасного производства.

Пробоподготовка аликвоты мочи состоит из отбора 5 мл пробы, озоления в присутствии азотной кислоты и перекиси водорода и измерения на ИСП-МС. Для измерений крови отбирают 10 мл, озолют в присутствии азотной кислоты и перекиси водорода (для ускорения процесса можно использовать микроволновый реактор для кислотного разложения), затем пропускают через анионообменные колонки со смолой TEVA для выделения плутония от мешающих примесей (уменьшение влияния матрицы, отделение от изотопов урана). Схема пробоподготовки крови представлена на рисунке 1.

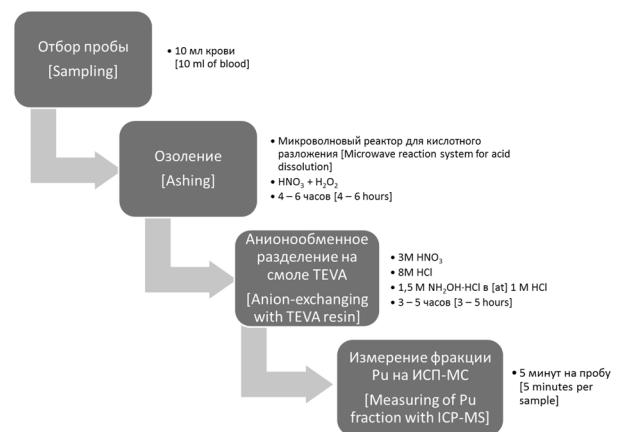


Рис. 1. Пробоподготовка крови с использованием анионообменной смолы TEVA

[Fig. 1. Blood sample preparation using anion-exchange TEVA resin]

Разделение на смоле включает в себя следующие действия: растворяют озоленный осадок в 15 мл 3 М HNO_3 , насыщают колонку 15 мл 3 М HNO_3 ; в этот момент устанавливается скорость потока в 0,5–0,6 мл/мин, 1 капля в 3–4 с, которая не должна превышать в течение всего разделения. Затем переводят раствор пробы в колонку, промывают стакан от пробы дважды небольшим количеством 3 М HNO_3 , добавляют в колонку 30 мл той же кислоты для промывки. После этого колонку промывают 30 мл 8 М HCl , а плутоний элюируют в чистый стакан с использованием 30 мл 1,5 М $\text{NH}_4\text{OH}\cdot\text{HCl}$ в 1 М HCl . Элюат выпаривают, избегая пересушивания осадка, озольют в присутствии азотной кислоты и перекиси водорода, затем растворяют в 5 мл 5% HNO_3 (матричный раствор для анализа на ИСП-МС).

Для измерения активности плутония используют режим реакционной ячейки с подачей углекислого газа для удаления следов природного урана, присутствующего в реактивах и воздухе, поскольку катион гидроксида урана

$^{238}\text{U}\text{H}^+$ создает интерференцию на аналитической массе ^{239}Pu . В ходе измерений детектируются импульсы от масс 239 и 242, соответствующие ^{239}Pu и ^{242}Pu . Соотношение импульсов на данных массах прямо пропорционально соотношению числа атомов изотопов в растворе. Из этого, с учетом количества введенной метки ^{242}Pu , рассчитывается активность ^{239}Pu .

Время, затраченное на пробоподготовку и измерение активности плутония в крови, обычно составляет 1–1,5 рабочих дня с момента отбора биоматериала. Пробоподготовка и измерение аликвоты мочи занимает 3–4 ч.

Результаты и обсуждение

Метрологические характеристики методики измерений

Для установления метрологических характеристик метода были выполнены исследования: у лиц, не имеющих производственного контакта с радиоактивностью, были отобраны 40 аликвот крови по 10 мл, в которые вводили метку ^{242}Pu , озолляли в присутствии азотной кислоты и перекиси до получения белого осадка, проводили анионообменное разделение плутония на смоле TEVA и растворяли в матричном растворе. Из них 16 проб были измерены для определения фоновых характеристик, в остальные 24 введены 3 различных уровня активности ^{239}Pu : 0,10, 0,50 и 4,99 мБк таким образом, что каждый уровень активности вводили в 8 проб. Работа выполнялась двумя лаборантами для определения показателей повторяемости методики анализа.

Среднее значение активности ^{239}Pu в аликвоте крови людей, не работающих в условиях производственного контакта с радиоактивностью, составило 0,089 мБк/проба, а $\sigma = \pm 0,023$ мБк/проба. Характеристики погрешности метода измерения активности ^{239}Pu в пробах крови при $P = 0,95$ представлены в таблице 2. Порог распознавания метода равен 0,054 мБк/проба.

Полученные результаты измерений проверяли по критериям Фишера и Кохрена на равенство генеральных дисперсий, а также проверяли расчетные значения смещений по критерию Стьюдента. Критерий Фишера не отрицает равенство дисперсий результатов измерения активности плутония в биосубстратах для всех серий (исполните-

лей). Критерий Кохрена также не отрицает однородность дисперсий, что позволяет за среднеквадратичное отклонение (СКО) принять среднее значение относительного СКО всех дисперсий в диапазоне. Расчетные значения t-статистики для смещений по критерию Стьюдента имеют P-значение, превышающее установленный уровень значимости, следовательно, смещение не значимо на фоне случайного разброса результатов измерений, что говорит об отсутствии выбросов. Таким образом, аттестованная нижняя граница интервала измерений составляет 0,1 мБк в аликвоте крови 10 мл.

Для измерений аликвоты мочи 5 мл в настоящее время разрабатывается первая редакция методики измерений, но проведенные эксперименты свидетельствуют об аналогичной нижней границе интервала измерений, равной 0,1 мБк, что соответствует 32 мБк·сут⁻¹ (при объеме СКМ, равном 1600 мл).

Особенности биокинетики плутония в организме под влиянием хелатов

Основными путями проникновения радионуклидов в организм в неконтролируемых условиях являются поступление через поврежденные кожные покровы и поступление через дыхательные пути (ингаляционно) [1]. В целях предупреждения радиационных поражений или уменьшения риска их возникновения, а также для ускорения выведения и снижения скорости отложения в органах основного депонирования, в случаях острого поступления актинидов проводится курс хелатотерапии [14–19]. Поскольку хелаты изменяют биокинетику плутония, оценка поступления значительно затрудняется. В целях сохранения здоровья пострадавшего лечение начинается незамедлительно (первая инъекция пентацина делается на здравпункте ФГУП «ПО «Маяк»»), таким образом, получение пробы крови или мочи до начала хелатотерапии практически невозможно. Для достоверной оценки уровня поступления необходимо оценить фактор влияния хелата на содержание плутония в крови и моче.

Функции удержания и выведения плутония оценены по стандартным моделям НКРЗ и МКРЗ [20–22]. Влияние пентацина на биокинетику плутония рассчитано с использованием модели *Konzen* [23], которая разработана для

Характеристики погрешности метода измерения активности ^{239}Pu в пробах крови, $P=0,95$

Таблица 2

[Table 2]

Characteristics of the ^{239}Pu measuring method's uncertainty in blood samples, $P=0.95$

Номер ОО [No of a sample for estimation]	Число се- рий (испол- нителей) [Number of runs (operators)]	Число ре- зультатов [Number of results]	Принятое опорное зна- чение, мБк [Accepted reference value, mBq]	Среднее ариф- метическое результатов, мБк [Arithmetic mean of results, mBq]	Диапазон из- мерений, мБк [Measurement range, mBq]	Показатель повторя- емости, % [Repeatability indicator, %]	НСП, % [Residual systematic error, %]	Показатель точности, % [Accuracy rate, %]
$m = 1, \dots, M$	L	N	$C_m \pm \Delta_{o,c}$	X_m	^{239}Pu , аликвота крови [blood aliquot]			
1	2	8	$0,0999 \pm 0,0048$	0,11				
2	2	8	$0,4989 \pm 0,0240$	0,50	0,1 – 5	± 50	$\pm 9,7$	± 51
3	2	8	$4,989 \pm 0,240$	5,4				

описания биокинетики плутония под воздействием хелатов. В этой модели добавлены несколько переходных камер, которые отмечены на рисунке 2. Также полужирными линиями выделены пути экскреции комплекса Pu-DTPA. Авторами статьи рассчитаны коэффициенты перехода плутония в новые переходные камеры из них, представленные в таблице 3.

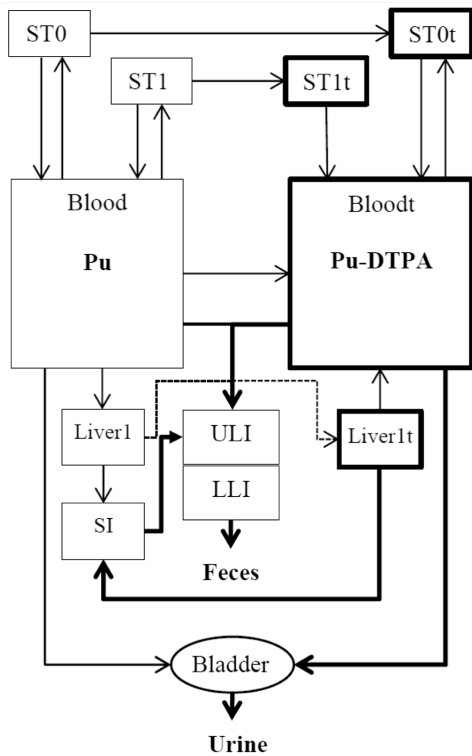


Рис. 2. Биокинетическая модель Konzen для Pu-DTPA [23]
[Fig. 2. Konzen biokinetic model for Pu-DTPA [23]]

Таблица 3

Рекомендуемые скорости перехода Pu-DTPA по модели Konzen [23]

[Table 3]

Recommended rates of Pu-DTPA transition in accordance with Konzen model]

Переход [Transition]	Скорость перехода, день ⁻¹ [Transition rate, day ⁻¹]
ST0 → ST0t	3,65
ST1 → ST1t	1,925
Blood → Bloodt	1,378
ST0t → Bloodt	300
ST1t → Bloodt	0,12
Bloodt → ST0t	145

² МУ 2.6.1.034–2014 «Порядок взаимодействия предприятий Госкорпорации «Росатом» и органов и организаций ФМБА России при нестандартном (раневом) и аварийном ингаляционном поступлении изотопов плутония и америция-241». М.: Федеральное медико-биологическое агентство, 2014. 73 с. [Methodical guidelines 2.6.1.034–2014. "Order of Interaction between enterprises of State Atomic Energy Corporation "Rosatom" and organs and organizations of FMBA of Russia in case of non-standard (wound) and accidental inhalation intake of plutonium and americium-241 isotopes." Moscow, Federal Medical and Biological Agency, 2014. 73 p. (In Russ.)]

Окончание таблицы 3

Переход [Transition]	Скорость перехода, день ⁻¹ [Transition rate, day ⁻¹]
Bloodt → ULI	4
Bloodt → Bladder	45,7
Liver1 → Liver 1t	2,2
Liver1t → Bloodt	0,067
Liver1t → SI	0,067
Пана [Wound]: Soluble → Blood	0,241
Пана [Wound]: Soluble → CIS	0,094
Пана [Wound]: CIS → Soluble	0,026

Также для расчетов использованы нижний предел измерений, равный 0,1 мБк ²³⁹Pu в 10 мл крови и в 5 мл мочи, объем крови и суточной мочи «среднего человека» по МКРЗ, равные 5300 и 1600 мл соответственно для мужчины [24].

Экспресс-оценка поступления плутония в случае поступления через поврежденные покровы кожи

В последнее десятилетие в условиях химико-металлургического и радиохимического производств ФГУП «ПО «Маяк»» преобладающим путем поступления актинидов в организм при нештатных ситуациях является поступление через поврежденные кожные покровы [1].

Местом первичного депонирования при данном пути поступления является кровь, что в течение длительного времени позволяет выполнять отбор аликвоты крови с целью оценки уровней поступления и ожидаемой эффективной дозы и назначения лечения.

Согласно МУ 2.6.1.034–2014², для поступления через поврежденные покровы кожи за уровень вмешательства (иссечения) приняты 40 Бк – активность плутония, которая при непосредственном попадании в кровь приводит к ОЭД, равной 20 мЗв. Чтобы наглядно показать влияние хелатотерапии на поведение плутония в организме, по модели Konzen [23] выполнены расчеты содержания нуклида спустя 1-е сутки после поступления 40 Бк плутония (табл. 4).

Можно отметить, что введение пентацина значительно ускоряет выведение из организма с мочой и снижает отложение плутония в скелете, печени и мягких тканях, но и также в разы уменьшает его содержание в крови.

С использованием методики анализа аликвоты крови методом ИСП-МС в течение 3 дней после непосредственного поступления ²³⁹Pu в кровь по модели Konzen возможно определить 40 Бк поступления плутония. Однако в такие сроки разница с естественным содержанием плу-

Таблица 4
Содержание плутония в органах и тканях спустя 24 ч после поступления 40 Бк ²³⁹Pu непосредственно в кровь
 [Table 4
Plutonium activity in organs and tissues 24 hours after the intake of 40 Bq of ²³⁹Pu directly into the blood]

Содержание в органе, Бк [Activity in organ, Bq]	Кровь [Blood]	Скелет [Skeleton]	Печень [Liver]	Мягкие ткани [Soft tissues]	Почки + моче- вой пузырь [Kidneys + bladder]	ЖКТ [GIT]	СКМ [24- hour urine]	Кал [Feces]
Без проведения хелатотера- пии [without chelation therapy]	17,6	8,7	5,2	7,6	0,3	0,3	0,3	0,1
С проведением хелатотерапии [with chelation therapy]	4,4	5,1	2,9	2,0	0,9	1,8	22,3	0,5

тония в крови колоссальна и составляет практически два порядка. Поскольку к настоящему времени в доступных литературных источниках отсутствует информация об исследованиях влияния пентацина на содержание плутония в крови, оценки, выполненные на основании модели *Konzen*, не подтверждены экспериментальными данными. Вследствие этого рекомендуется производить отбор крови в первые часы после поступления, когда расчетные значения содержания плутония в крови по стандартной модели и модели *Konzen* практически не отличаются; в идеальном случае отбор крови должен производиться до или в момент введения пентацина. В течение первых суток можно определить от 0,1 до 1,2% от 40 Бк поступления на основании результатов измерения содержания плутония в крови. С анализом аликвоты мочи можно определить 0,03 Бк·сут⁻¹, что позволяет определить 0,13% от 40 Бк поступления в первые сутки после поступления. Учитывая несомненную оперативность метода, его стоит использовать для экспресс-оценки поступления, но так как неопределенность дозы при измерении в первичном депо – крови, будет меньше, в случае поступления плутония через поврежденные покровы кожи следует проводить оба анализа. После получения экспресс-оценки методом ИСП-МС следует в зависимости от уровней поступления выполнить дозиметрическое сопровождение согласно требованиям актуальных методических документов, используя МВИ³.

Экспресс-оценка поступления плутония в случаях ингаляционного поступления

При ингаляционном поступлении местом первичного депонирования являются легкие, затем плутоний быстро перераспределяется в организме. Содержание плутония в крови быстро падает, поэтому в этом случае аликвоту крови целесообразно отбирать в течение 1-х суток после поступления.

Согласно Нормам радиационной безопасности (НРБ-99/2009)⁴, предел годового поступления (ПГП) для про-

межуточных соединений равен 78 Бк, а для труднорастворимых соединений – 1300 Бк. Как и в случае поступления через поврежденные покровы кожи, введение пентацина значительно ускоряет выведение из организма с мочой и снижает отложение плутония в скелете, печени и мягких тканях, а также существенно уменьшает его содержание в крови. В моче в течение первого дня после поступления 1 ПГП промежуточных соединений с пентацином выведется 1,07 Бк·сут⁻¹, а труднорастворимых – 0,18 Бк·сут⁻¹.

Согласно модели *Konzen*, для промежуточных соединений в течение первых 2 дней (43 ч после поступления) возможно определить менее 1 ПГП на основании результатов измерения содержания плутония в крови. Как и для случаев поступления плутония через поврежденные покровы кожи, рекомендуется отбирать кровь в первые часы после поступления, наиболее эффективно производить отбор до или в момент введения пентацина. В течение первых суток можно определить от 3 до 23% от 78 Бк поступления. В случае анализа аликвоты мочи в первые сутки определяется 3% от 78 Бк поступления. Для труднорастворимых соединений в течение первых суток (21 ч после поступления) возможно определить менее 1 ПГП. В течение первых 12 ч можно определить от 18 до 47% от 1300 Бк поступления. В случае анализа аликвоты мочи в 1-е сутки определяется 17% от 1300 Бк поступления, чего может быть недостаточно для целей аварийного индивидуального дозиметрического контроля (рекомендуется измерять 10% от ПГП). При вероятности поступления труднорастворимых соединений рекомендуется отбирать большие аликвоты биосубстратов.

Учитывая несомненную оперативность метода анализа аликвоты мочи, его стоит использовать для экспресс-оценки поступления всех рассмотренных типов соединений плутония. Но так как неопределенность дозы при измерении в крови будет меньше, в случае ингаляционных поступлений следует проводить оба анализа. После получения экспресс-оценки методом ИСП-МС следует, в зависимости от уровней поступления, выполнить дози-

³ «Методика выполнения измерений изотопов плутония и америция в образцах мочи и кала в условиях повышенной экскреции, стимулированной введением пентацина, у работников радиохимических производств». Озерск, 2011. 40 с. [Measurement technique for plutonium and americium isotopes in urine and fecal samples collected from radiochemical production workers in conditions of increased excretion stimulated by pentacine administration. Ozersk, 2011. 40 p. (In Russ.)].

⁴ СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с. [SanPiN 2.6.1.2523-09. Radiation Safety Standards (RSS-99/2009): Sanitary Regulations and Standards Moscow, Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2009. 100 p. (In Russ.)]

метрическое сопровождение согласно требованиям актуальных методических документов, используя МВИ⁵.

Результаты применения метода ИСП-МС в аварийных ситуациях

Для дозиметрического сопровождения случаев поступления через поврежденные покровы кожи и аварийном ингаляционном поступлении метод масс-спектрометрии (экспресс-измерения аликвоты мочи) применяется в качестве предварительной оценки. Следующим шагом является измерение пробы на альфа-спектрометре для окончательной оценки. Сравнение результатов измерений содержания плутония в СКМ методом ИСП-МС и методом альфа-спектрометрии, проведенных с момента внедрения метода в ЮУриБФ, приведено в таблице 5.

Таблица 5

Результаты измерений активности плутония методом ИСП-МС и методом альфа-спектрометрии в СКМ

[Table 5

Results of plutonium activity measurements in 24-hour urine samples using ICP-MS and alpha spectrometry]

№ п/п [S No]	Активность ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu, мБк/СКМ [Activity of ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu, mBq/24-urine]		Относительная ошибка, % [Relative error, %]
	ИСП-МС [ICP-MS]	Альфа-спектрометрия [Alpha spectrometry]	
1	238	255	6,5
2	148	123	20,3
3	31,7	30	5,6
4	113	103	9,7
5	14,4·10 ³	12,8·10 ³	12,2
6	25,0·10 ²	23,2·10 ²	7,9
7	717	733	2,3
8	227	178	27,1
9	130	112	16,4

Полученные данные показывают высокую сходимость результатов, полученных как экспресс-измерениями практически без пробоподготовки в течение нескольких часов, так и методом альфа-спектрометрии, который нуждается в продолжительной и трудоемкой радиохимической подготовке и в длительных измерениях, занимающих около недели. Относительная ошибка не превышает 27,1%, что практически в два раза ниже относительной суммарной погрешности используемых методик. Это свидетельствует о целесообразности применения метода ИСП-МС для предварительной оценки дозовой нагрузки, обусловленной поступлением ²³⁹Pu и ²⁴⁰Pu работникам, вовлеченным в нештатные ситуации.

Следует отметить, что экспресс-оценка может быть занижена из-за вероятности присутствия в поступившей смеси ²³⁸Pu и ²⁴¹Am. Существенным недостатком метода

ИСП-МС является невозможность определения ²³⁸Pu на приемлемом уровне, что может привести к недооценке дозы в случаях поступления этого изотопа.

Заключение

Выполненные исследования по оценке применимости метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой для получения экспресс-оценки поступления плутония по содержанию в крови показали, что данный метод целесообразно применять в течение первых часов после регистрации факта ингаляционного поступления или повреждения кожных покровов и загрязнения их актинидами. Использование результатов измерения активности плутония в аликвоте мочи также целесообразно для первичной оценки поступления.

Предел обнаружения метода, составляющий 0,1 мБк ²³⁹Pu в 10 мл крови (в 5 мл мочи), позволяет определять 0,1–1,2% от 40 Бк в 1-е сутки при поступлении плутония через поврежденные кожные покровы (0,13% от 40 Бк в 1-е сутки при экспресс-анализе аликвоты мочи), 3–23% от 78 Бк в 1-е сутки при ингаляционном поступлении промежуточных соединений плутония (3% от 78 Бк в 1-е сутки при экспресс-анализе аликвоты мочи), 18–47% от 1300 Бк в первые 12 ч при ингаляционном поступлении труднорастворимых соединений плутония (17% от 1300 Бк в 1-е сутки при экспресс-анализе аликвоты мочи).

Метод альфа-спектрометрии необходим для всех случаев поступления актинидов при возникновении нештатной ситуации для корректной оценки содержания ²³⁸Pu и ²⁴¹Am. Чтобы модифицирующее влияние хелатотерапии при получении оценок поступления отсутствовало, пробу крови рекомендуется отбирать до момента введения пентацина.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Баталов В.Р. выполнил разработку методики измерений, собрал и проанализировал данные, написал черновик рукописи и представил окончательный вариант статьи в редакцию журнала.

Соколова А.Б. выполнила анализ литературы и полученных данных, а также отредактировала промежуточный вариант статьи.

Ефимов А.В. осуществил общее руководство выполнением работы, отредактировал и утвердил окончательный вариант статьи для публикации.

Джунушалиев А.Б. провел моделирование экскреции плутония при различных сценариях поступления и отредактировал промежуточный вариант статьи.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела радиационной безопасности и дозиметрии ЮУриБФ за помощь в радиохимической подготовке проб. Авторы благодарны рецензентам за конструктивные замечания и предложения, которые позволили существенно улучшить качество статьи.

⁵ «Методика выполнения измерений изотопов плутония и америция в образцах мочи и кала в условиях повышенной экскреции, стимулированной введением пентацина, у работников радиохимических производств». Озерск, 2011. 40 с. [Measurement technique for plutonium and americium isotopes in urine and fecal samples collected from radiochemical production workers in conditions of increased excretion stimulated by pentacine administration. Ozersk, 2011. 40 p. (In Russ.)].

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 задания Российской Федерации «Развитие научно-методического обеспечения индивидуального дозиметрического контроля профессионального внутреннего облучения» код – 11.303.22.2 шифр «Контроль-22», финансируемого ФМБА России.

Литература


- Соколова А.Б., Ефимов А.В. Современное состояние системы дозиметрического сопровождения случаев острого поступления актинидов у работников ПО «Маяк» // Вопросы Радиационной Безопасности. Федеральное государственное унитарное предприятие Производственное объединение Маяк, 2018. № 3 (91), С. 56–64.
- Хохряков В.В., Хохряков В.Ф., Сулова К.Г. и др. Состояние и перспективы развития дозиметрии внутреннего облучения персонала ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. 2004. Т. 3, С. 25–40.
- Gajek R., Barley F., She J. Determination of essential and toxic metals in blood by ICP-MS with calibration in synthetic matrix // Analytical Methods. The Royal Society of Chemistry, 2013. Vol. 5, № 9. P. 2193–2202.
- Palmer C.D., Lewis M.E., Geraghty C.M. et al. Determination of lead, cadmium and mercury in blood for assessment of environmental exposure: A comparison between inductively coupled plasma-mass spectrometry and atomic absorption spectrometry // Spectrochim. Acta Part B At. Spectrosc. 2006. Vol. 61, № 8. P. 980–990.
- Зайцева Н.В., Уланова Т.С., Вейхман Г.А. и др. Пат. № 2585369 С1 Российская Федерация, МПК G01N 33/84. Способ определения содержания кадмия, свинца, мышьяка, хрома, никеля, меди, цинка, марганца, ванадия, стронция, селена, таллия в крови методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, опубл. 27.05.2016.
- Уланова Т.С., Гилева О.В., Стенно Е.В. и др. Определение стронция в цельной крови и моче методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой // Биомедицинская Химия. НИИ биомедицинской химии имени В.Н. Ореховича, 2015. Т. 61, № 5, С. 613–616.
- Уланова Т.С., Стенно Е.В., Вейхман Г.А. и др. Оценка содержания токсичных микроэлементов в крови рабочих машиностроительного предприятия // Методы и Объекты Химического Анализа. 2013. Т. 8, № 2, С. 72–75.
- Izumoto Y., Fukutsu K., Takamura K. et al. Rapid detection of plutonium contamination with and without uranium contamination in wounds by x-ray fluorescence // Journal of Radiology Protection. IOP Publishing, 2020. Vol. 40, № 3. P. 692–703.
- Музгин В.Н., Емельянова Н.Н., Пупышев А.А. Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой – новый метод в аналитической химии // Аналитика и Контроль. 1998. Т. 2, № 3–4, С. 3–25.
- Каменев А.Г., Чубинский-Надеждин И.В., Куликов Ю.В. и др. Масс-спектрометрический анализ изотопного состава актинидов в ультра-малых пробах. Тезисы докладов Всероссийской Конференции «Химический анализ веществ и материалов». Москва, 16-20 апреля, 2000. М., 2000. С. 366–367.
- Чубинский-Надеждин И.В., Куликов Ю.В., Каменев А.Г. и др. Чувствительность и пределы обнаружения при масс-спектрометрическом анализе ультрамалых проб урана и плутония // Научное Приборостроение. 2003. Т. 13, № 1, С. 24–31.
- Xu Y., Qiao J., Hou X. et al. Determination of plutonium isotopes (^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu) in environmental samples using radiochemical separation combined with radiometric and mass spectrometric measurements // Talanta. 2014. Vol. 119. P. 590–595.
- Епов В.Н., Evans R.D., Zheng J. et al. Rapid fingerprinting of ^{239}Pu and ^{240}Pu in environmental samples with high U levels using on-line ion chromatography coupled with high-sensitivity quadrupole ICP-MS detection // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 2007. Vol. 22, № 9. P. 1131–1137.
- Smith V.H. Therapeutic removal of internally deposited transuranium elements // Health Physics. 1972. Vol. 22, № 6. P. 765–778.
- Volf V. Optimisation and Status of Chelation Therapy // Radiation Protection Dosimetry. Oxford Academic, 1989. Vol. 26, № 1–4. P. 331–335.
- Сохранич А.Л., Кабилова Н.Р., Любчанский Э.Р. Пат. № 2051682 Российская Федерация, МПК А61К 33/30. Способ профилактики поражения плутонием-239 в ранние сроки, опубл. 10.01.1996.
- Сохранич А.Л., Любчанский Э.Р. Пат. № 2026066 С1 Российская Федерация, МПК А61К 9/12, А61К 33/00. Способ выведения из организма плутония-239, поступившего через легкие, опубл. 09.01.1995.
- Singh V.K., Romaine P.L.P., Seed T.M. Medical Countermeasures for Radiation Exposure and Related Injuries: Characterization of Medicines, FDA-Approval Status and Inclusion into the Strategic National Stockpile // Health Physics. 2015. Vol. 108, № 6. P. 607–630.
- Bhattacharyya M.H., Breitenstein B.D., Metivier H. et al. Guidebook for the treatment of accidental internal radionuclide contamination of workers // Radiation Protection Dosimetry. 1992. Vol. 41, № 1. P. 1–49.
- Vennart J. Limits for intakes of radionuclides by workers: ICRP Publication 30 // Health Physics. 1981. Vol. 40, № 4. P. 477–484.
- Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides – Part 2 Ingestion Dose Coefficients. ICRP Publication 67. Ann. ICRP 23 (3-4), 1993.
- NCRP Report No 156, Development of a Biokinetic Model for Radionuclide-contaminated Wounds and Procedures for their Assessment, Dosimetry and Treatment Radium History Mosaic Report No 157, Radiation Protection in Educational Institutions // Journal of Radiology Protection. IOP Publishing, 2008. Vol. 28, № 2. P. 261–264.
- Konzen K., Brey R. Development of the Plutonium-DTPA Biokinetic Model // Health Physics. 2015. Vol. 108, № 6. P. 565–573.
- Valentin J. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values: ICRP Publication 89 // Ann. ICRP. 2002. Vol. 32, № 3. P. 1–277.

Поступила: 15.08.2022 г.


Баталов Вадим Робертович – исполняющий обязанности младшего научного сотрудника Южно-Уральского института биофизики Федерального медико-биологического агентства. **Адрес для переписки:** 456783, Россия, Челябинская область, г. Озерск, Озерское шоссе, д. 19, E-mail: vrbatalov@mail.ru


ORCID  <https://orcid.org/0000-0001-8807-9494>

Соколова Александра Борисовна – научный сотрудник Южно-Уральского института биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия

ORCID  <https://orcid.org/0000-0002-6036-4178>

Ефимов Александр Владимирович – заведующий отделом радиационной безопасности и дозиметрии Южно-Уральского института биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия

ORCID  <https://orcid.org/0000-0003-1110-6559>

Джунушалиев Артем Борисович – инженер-программист Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Южно-Уральский институт биофизики» Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия
ORCID  <https://orcid.org/0000-0003-0906-6463>

Для цитирования: Баталов В.Р., Соколова А.Б., Ефимов А.В., Джунушалиев А.Б. Оценка применимости метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой для задач специального индивидуального дозиметрического контроля // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 77-87. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-77-87

Evaluation of the applicability of the inductively coupled plasma mass spectrometry method for special individual dosimetry monitoring

Vadim R. Batalov, Alexandra B. Sokolova, Alexander V. Efimov, Artem B. Dzhunushaliev

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

In the condition of modern radiation hazardous production, higher levels of personnel internal exposure are mainly due to the intake of radionuclides in situations caused by faulty equipment or wrong actions of personnel which can or do result in the exposure that exceeds established standards. In such cases, to determine the intake and committed effective dose, daily amount of urine and/or feces is collected followed by the preparation of loads and their subsequent measurements. For a total, it takes three to eight days to obtain the result depending on the method of measurement used. In case of acute intake of plutonium, it is important to estimate the levels of the nuclide intake as soon as possible in order to decide on treatment strategy and dose reduction. To achieve the above goal, the Southern Urals Biophysics Institute has developed a technique for measuring the plutonium-239 activity in blood using an inductively coupled plasma mass spectrometer as in the first hours and 24 hours after intake (through inhalation or damaged skin) the radionuclide concentration in blood is at its maximum level. Also a method has been developed to measure plutonium in urine aliquot using mass-spectrometry to perform special individual dosimetry monitoring that requires almost no sample preparation which allows to estimate the intake within a few hours. It is shown that, depending on the route of intake and chemical form of plutonium compounds entered, the measurement of plutonium activity in blood and urine aliquot performed by the inductively coupled plasma mass spectrometer method allows to determine from 0.1 to 47% of intake limit within the first 24 hours after an accident. The analysis of a blood sample takes one to one-and-a-half workdays against a week required to analyze a urine sample using alpha-spectrometry. The application of the developed methodology, apart from the goal of individual dosimetry monitoring, will provide new information on the effects of chelation therapy on the plutonium behavior in the human body.

Key words: *inductively coupled plasma mass-spectrometry, plutonium, blood, urine, internal dosimetry.*

Vadim R. Batalov

Southern Urals Biophysics Institute

Address for correspondence: Ozerskoe shosse, 19, Ozersk, 456780, Chelyabinsk oblast, Russia; E-mail: vrbatalov@mail.ru

Authors' personal contribution

Batalov V.R. performed the development of the measuring technique, collected and analyzed data, prepared the article draft and represented the final version of the manuscript for publication in the journal.

Sokolova A.B. analyzed literature and the obtained data, revised an intermediate version of the manuscript.

Efimov A.V. provided general management of the project, edited and approved the final version of the manuscript.

Dzhunushaliev A.B. performed the modelling of plutonium excretion under different intake scenarios and revised an intermediate version of the manuscript.

Acknowledgements

The authors would like to thank the employees of the SUBI's Internal Dosimetry Laboratory for their help in radiochemical preparation of samples. The authors are also grateful to the reviewers for constructive comments and suggestions that have significantly improved the quality of the manuscript.

Conflict of interests

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

Sources of funding


The work was carried out within the framework of the State Assignment of the Russian Federation "Development of scientific and methodological support for individual dosimetry monitoring of occupational internal exposure" code – 11.303.22.2 name code "Control-22", funded by the Federal Medical and Biological Agency of Russia.

References

- Sokolova AB, Efimov AV. Current State of the Dosimetry Monitoring of Acute Actinide Intakes on the Mayak PA Workers. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Radiation Safety Problems*. 2018;3(91): 56-64 (In Russian).
- Khokhryakov VV, Khokhryakov VF, Suslova KG, et al. Status and Prospects of the Internal Dosimetry for "Mayak" PA Personnel. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Radiation Safety Problems*. 2004;3(35): 25-40 (In Russian).
- Gajek R, Barley F, She J. Determination of essential and toxic metals in blood by ICP-MS with calibration in synthetic matrix. *Analytical Methods. The Royal Society of Chemistry*, 2013;5(9): 2193–2202.
- Palmer CD, Lewis ME, Geraghty CM, et al. Determination of lead, cadmium and mercury in blood for assessment of environmental exposure: A comparison between inductively coupled plasma–mass spectrometry and atomic absorption spectrometry. *Spectrochimica. Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 2006;61(8): 980–990.
- Zaytseva NV, Ulanova TS, Veykhman GA, et al. Pat. 2585369 C1 Russian Federation, IPC G01N 33/84. Method of Determining Content of Cadmium, Lead, Arsenic, Chromium, Nickel, Copper, Zinc, Manganese, Vanadium, Strontium, Selenium, Thallium in Blood by Mass Spectrometry with Inductively Coupled Plasma, publ. 27.05.2016 (In Russian).
- Ulanova TS, Gileva OV, Stenno EV, et al. Determination of Strontium Content in Whole Blood and Urine by ICP-MS. *Biomeditsinskaya khimiya = Biomedical Chemistry*. Scientific Research Institute of Biomedical Chemistry named after V.N. Orekhovich. 2015;61(5): 613–616 (In Russian).
- Ulanova TS, Stenno EV, Veykhman GA, et al. Evaluation of Toxic Trace Elements in the Blood of Machine-Building Plant Workers. *Metody i objekty khimicheskogo analiza = Methods and Objects of Chemical Analysis*. Taras Shevchenko National University of Kyiv. 2013;8(2): 72–75 (In Russian).
- Izumoto Y, Fukutsu K, Takamura K, et al. Rapid detection of plutonium contamination with and without uranium contamination in wounds by x-ray fluorescence. *Journal of Radiological Protection*. IOP Publishing. 2020;40(3): 692–703.
- Muzgin VN, Emelyanova NN, Pupyshev AA. Mass Spectrometry with Inductively Coupled Plasma – a New Method in Analytical Chemistry. *Analitika i Kontrol = Analytics and Control*. 1998;2(3–4): 3–25 (In Russian).
- Kamenev AG, Chubinskiy-Nadezhdin IV, Kulikov YuV, et al. Mass Spectrometric Analysis of Isotopic Composition of Actinides in Ultra-small Samples. Abstracts of the All-Russian Conference "Chemical analysis of substances and materials". Moscow, 16-20 April, 2000. Moscow, 2000. P. 366–367 (In Russian).
- Chubinskiy-Nadezhdin IV, Kulikov YuV, Kamenev AG, et al. Sensitivity and Detection Limits in Mass Spectrometric Analysis of Ultra-small Samples of Uranium and Plutonium. *Nauchnoe Priborostroenie = Scientific Instrumentation*. 2003;13(1): 24–31 (In Russian).
- Xu Y, Qiao J, Hou X, et al. Determination of plutonium isotopes (^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu) in environmental samples using radiochemical separation combined with radiometric and mass spectrometric measurements. *Talanta*. 2014;119: 590–595.
- Epov VN, Evans RD, Zheng J, et al. Rapid fingerprinting of ^{239}Pu and ^{240}Pu in environmental samples with high U levels using on-line ion chromatography coupled with high-sensitivity quadrupole ICP-MS detection. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. 2007;22(9): 1131–1137.
- Smith VH. Therapeutic removal of internally deposited transuranium elements. *Health Physics*. 1972;22(6): 765–778.
- Volf V. Optimisation and Status of Chelation Therapy. *Radiation Protection Dosimetry*. Oxford Academic. 1989;26(1–4): 331–335.
- Sokhranich AL, Kabirova NR, Lyubchansky EhR. Pat. RU 2051682 Russian Federation, IPS A61K 33/30. Method of Plutonium-239 Damage Prophylaxis in the Early Period. 1996 (In Russian).
- Sokhranich AL, Lyubchansky EhR. Pat. RU 2026066 C1 Russian Federation, IPS A61K 9/12, A61K 33/00. Method for Removing Plutonium-239 Ingressed Via Lungs. 1995 (In Russian).
- Singh VK, Romaine PLP, Seed TM. Medical Countermeasures for Radiation Exposure and Related Injuries: Characterization of Medicines, FDA-Approval Status and Inclusion into the Strategic National Stockpile. *Health Physics*. 2015;108(6): 607–630.
- Bhattacharyya MH, Breitenstein BD, Metivier H, et al. Guidebook for the treatment of accidental internal radionuclide contamination of workers. *Radiation Protection Dosimetry*. 1992;41(1): 1–49.
- Vennart J. Limits for intakes of radionuclides by workers: ICRP Publication 30. *Health Physics*. 1981;40(4): 477–484.
- Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides – Part 2 Ingestion Dose Coefficients. ICRP Publication 67. Ann. ICRP 23 (3-4), 1993.
- NCRP Report No 156, Development of a Biokinetic Model for Radionuclide-contaminated Wounds and Procedures for their Assessment, Dosimetry and Treatment Radium History Mosaic Report No 157, Radiation Protection in Educational Institutions. *Journal of Radiological Protection*. IOP Publishing, 2008;28(2): 261–264.
- Konzen K, Brey R. Development of the Plutonium-DTPA Biokinetic Model. *Health Physics*. 2015;108(6): 565–573.
- Valentin J. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values: ICRP Publication 89. Ann. ICRP. 2002; 32 (3): 1–277.

Received: August 15, 2022


For correspondence: Vadim R. Batalov – Junior Researcher, Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency (Ozerskoe shosse, 19, Ozersk, 456780, Chelyabinsk oblast, Russia; E-mail: vrbatalov@mail.ru)

ORCID  <https://orcid.org/0000-0001-8807-9494>

Alexandra B. Sokolova – Researcher, Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency, Ozersk, Russia

ORCID  <https://orcid.org/0000-0002-6036-4178>

Alexander V. Efimov – Head of Department of Radiation Safety and Dosimetry, Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency, Ozersk, Russia

ORCID  <https://orcid.org/0000-0003-1110-6559>

Artem B. Dzhunushaliev – Programmer engineer, Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency, Ozersk, Russia

ORCID  <https://orcid.org/0000-0003-0906-6463>

For citation: Batalov V.R., Sokolova A.B., Efimov A.V., Dzhunushaliev A.B. Evaluation of the applicability of the inductively coupled plasma mass spectrometry method for special individual dosimetry monitoring. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 4. P. 77-87. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-77-87

Оценка уровня годового поступления трития в воздух с поверхности озера Кызылташ

В.В. Востротин, А.Ю. Янов

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

В статье представлены результаты исследования уровней объемной активности трития в водоеме-хранилище жидких радиоактивных отходов Производственного объединения «Маяк» – озере Кызылташ. Недостаточная изученность путей миграции трития из водоема и их количественная оценка в современных условиях не позволяют в полной мере объективно оценивать и прогнозировать влияние объекта «ядерного наследия» на население г. Озёрска и окружающую среду. Исследование было направлено на получение научных результатов, которые будут являться отправной точкой для формирования программы мониторинга промышленных водоёмов Производственного объединения «Маяк» по тритию. Целью исследования являлась оценка динамики объемной активности трития в озере Кызылташ, оценка параметров водного баланса и уровня поступления трития в воздух с его поверхности в безледоставный период. Было отобрано 33 пробы воды. Измерения объемной активности трития в воде были проведены с использованием жидкостно-сцинтилляционного спектрометра Quantulus-1220. Среднее значение уровня объемной активности трития в 2021 г. составило $1,57E+04$ Бк/л, $SD = 1,1E+03$ Бк/л, что более чем в 2 раза превышало уровень вмешательства. Выявлен тренд снижения среднемесячной объемной активности трития в водоеме в течение периода наблюдения. При проведении расчетов установлено, что в 2021 г. с поверхности озера Кызылташ в безледоставный период в процессе испарения в воздух поступило 196 ТБк трития, что сопоставимо с выбросами трития всех предприятий РФ (179 ТБк), кроме Производственного объединения «Маяк». Полученные значения испарившегося трития составили 13% от выбросов в атмосферу трития Производственного объединения «Маяк» в 2020 г. Всего с поверхности водоема испарилось ~12,2 млн м³ в течение периода наблюдения. Созданная модель зависимости объемной активности трития от времени в озере Кызылташ с помощью экспоненциально убывающей функции позволила определить водный баланс озера Кызылташ в безледоставный период в 2021 г. с дефицитом ~6,3 млн м³. Исследование параметров модели позволяет прогнозировать санитарно-гигиенические показатели водоема с позиции радиационной безопасности и рассчитывать водный баланс водоема в отдельные промежутки времени.

Ключевые слова: тритий, озеро Кызылташ, миграция трития, водный баланс, Производственное объединение «Маяк».

Введение

Озеро Кызылташ (Водоем В-2) является открытым хранилищем естественного происхождения жидких радиоактивных отходов (ЖРО) ПО «Маяк». Код водного объекта в Государственном водном реестре 14010500711111200007640, площадь водоема, по различным источникам составляет 18,2–19,47 км², объем – 84 млн м³ [1,2]. Озеро расположено в предгорье Южного Урала и по своим характеристикам относится к водоемам эрозионно-тектонического происхождения с водным балансом, характерным для объектов такого типа [3]. С 1954 г. озеро Кызылташ приобрело статус закрытого

водоема-хранилища низкоактивных ЖРО, сброс воды в реку Теча из данного озера был прекращен [4]. По состоянию на 2013 г. в нем содержится 0,03 млн Ки ЖРО. Исходя из концепции ПО «Маяк» по выводу водоемов из эксплуатации, в ближайшее время предприятие не планирует прекращения использования Водоема В-2, что является отложенной проблемой «ядерного наследия» [5].

Долговременное использование озера Кызылташ в качестве хранилища ЖРО привело к накоплению в нем радионуклидов, содержащихся в сбросах предприятия. Ближайшие предприятия и организации г. Озёрска находятся на расстоянии 100–600 м, а ближайшие объекты

Востротин Вадим Владимирович

Южно-Уральский институт биофизики

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

жилой застройки на расстоянии порядка 1,7 км от озера Кызылташ, которое является источником потенциальной опасности для окружающей среды, жителей и работников предприятий и организаций г. Озерска.

Одним из основных радионуклидов, находящихся в выбросах и сбросах ПО «Маяк», является тритий. Количество выбросов и сбросов трития предприятием является регламентированным. При этом в результате производственной деятельности ПО «Маяк» осуществляет выбросы трития в атмосферу на 1–2 порядка величины ниже регламентных значений [6].

В открытой печати имеется небольшое количество публикаций, в которых описано радиоэкологическое и санитарное состояние озера Кызылташ. В частности, имеются лишь единичные результаты исследований объемной активности (ОА) трития в водоеме в 2007–2009 гг., 2015 г. [7, 8] и количества переноса трития в атмосферу за счет испарения [2]. При этом средние значения ОА трития в водоеме были на уровне 7600 Бк/л, что, согласно нормам радиационной безопасности (НРБ-99/2009), соответствует уровню вмешательства (УВ) по тритию в питьевой воде¹. Недостаточная изученность путей миграции трития из водоема и их количественная оценка в современных условиях не позволяют в полной мере объективно оценивать и прогнозировать влияние объекта «ядерного наследия» на население г. Озерска и окружающую среду. Исследование было направлено на получение научных результатов, которые будут являться отправной точкой для формирования программы мониторинга промышленных водоёмов ПО «Маяк» по тритию.

Цель исследования – оценка динамики ОА трития в озере Кызылташ, оценка параметров водного баланса и уровня поступления трития в воздух с его поверхности в безледоставный период.

Материалы и методы

В 2021 г. озеро Кызылташ полностью освободилось от льда 20 апреля. В период с 27.04.2021 г. по 27.09.2021 г. проводился отбор воды из озера 3–4 раза в месяц. Отбор воды производился в 2 точках (рис. 1).

Точка отбора проб №1 располагалась в районе метеостанции ПО «Маяк», в непосредственной близости от предприятия. Точка отбора проб № 2 находилась на расстоянии 2,4 км от точки № 1, в районе гаражного строительного кооператива (ГСК). Выбор точек отбора проб был обусловлен параметром максимального удаления друг от друга при беспрепятственной доступности подхода к берегу.

Всего было отобрано 33 пробы воды (14 – в точке № 1, 19 – в точке № 2), из которых 28 проб отбирались параллельно: в один день в 2 точках – по 14 проб в каждой точке.

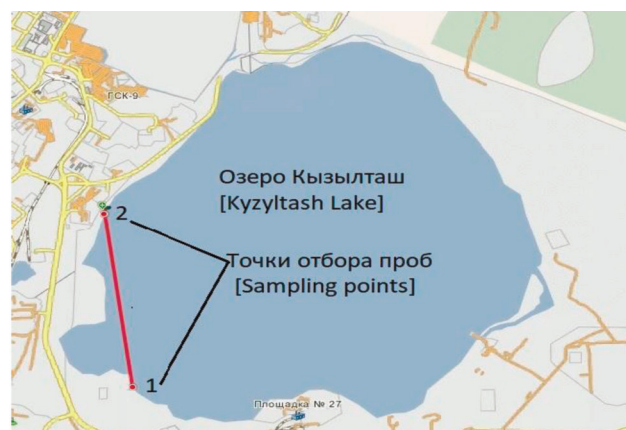


Рис. 1. Точки отбора проб воды из озера Кызылташ
Fig. 1. Sampling points of water from the Kyzyltash lake

С целью измерения ОА трития в пробе проводилась дистилляция аликвоты объемом 100 см³. Из полученного дистиллята изготавливался счетный образец. В виалу автоматическим распределителем Dispenser вносился ЖС Optiphase Hisafe III объемом 12 см³ и дистиллят пробы объемом 8 см³, отобранный дозатором. Виала плотно закрывалась крышкой, встряхивалась и помещалась для охлаждения и высвечивания в измерительное отделение Quantulus-1220, где выдерживалась не менее 12 ч при положении регулятора температуры +18°C.

Измерения ОА трития в воде были проведены в соответствии с МВИ (Методика измерения объемной активности трития в пробах воды и мочи с использованием жидкостно-сцинтилляционного спектрометра Quantulus-1220)².

Для определения поступления трития в атмосферу в процессе испарения использовали эмпирическую формулу Н.Н. Иванова [9]:

$$E_M = 0,0018 \times (25 + t^{\circ C})^2 \times (100 - f) \quad (1)$$

где:

E_M – испаряемость за месяц (мм/мес.);

$t^{\circ C}$ – средняя температура воздуха за месяц (°C);

f – средняя относительная влажность воздуха за месяц (%).

Среднемесечные значения температуры и влажности воздуха определялись с использованием результатов их измерений на ближайшей метеостанции (п. Аргаяш) по данным портала gr5 [10].

Результаты и обсуждение

Полученные в результате измерений данные по ОА трития подверглись проверке на нормальность рас-

¹ Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) [Sanitary rules and standards SanPin 2.6.1.2523-09. Radiation safety standards (RSS-99/2009) (In Russ.)].

² Методика выполнения измерений объемной активности трития в пробах воды и мочи с использованием жидко-сцинтилляционного спектрометра Quantulus-1220. ФГУП «Южно-Уральский институт биофизики». Озерск, 2016), свидетельство об аттестации МИ № 222.0032/RA.RU.311866/2019 [Methods for measuring the volume activity of tritium in water and urine samples using a Quantulus-1220 liquid scintillation spectrometer; Federal State Unitary Enterprise South Ural Institute of Biophysics. Ozersk, 2016.), certificate of certification No. 222.0032 / RA.RU.311866 / 2019 (In Russ.)].

предела полученных значений в выборках. Вначале проводилась проверка данных, полученных при измерении 28 проб из разных точек отбора, собранных в один день с 10.06.2021 г. по 27.09.2021 г. Проверка гипотезы о нормальности распределения проводилась с помощью теста Шапиро – Уилка. Значение критерия Шапиро – Уилка для выборки данных точки отбора № 2 составило: $W = 0,95$ при уровне значимости $p = 0,59$, для точки отбора №1 $W = 0,97$ при уровне значимости $p = 0,91$. Результаты проверки показали, что распределения ОА трития в выборках статистически значимо не отличались от нормального ($p > 0,05$). Статистические характеристики ОА трития в точках отбора проб в период с 10.06.2021 г. по 27.09.2021 г. приведены в таблице 1.

При сравнении значений переменных двух выборок (точки отбора № 1 и № 2) с использованием парного t-теста Стьюдента ($t = -1,06$, $p = 0,299$) не было выявлено статистически значимых различий по среднему значению, что позволило объединить обе выборки в одну совокупность с целью проведения дальнейших расчетов. В апреле и мае 2021 г. отбор проб воды осуществлялся только в точке отбора № 2. При предположении о том, что условия, при которых отбирались пробы в точке № 2 в апреле и мае 2021 г., соответствовали условиям в точке № 1, в период отбора проб значения, полученные в результате измерения 5 проб, полученные в апреле и мае 2021 г., были добавлены в выборку для точки № 2 и также объединены в одну совокупность. Таким образом, для количественного определения миграции трития с поверхности озера Кызылташ были использованы результаты измерений всех проб воды, отобранных при проведении экспедиций.

На основании полученных данных была построена регрессионная экспоненциально-убывающая модель зависимости средней ОА трития от времени отбора проб по месяцам (рис. 2). Методом экстраполяции было получено среднее значение ОА трития в октябре 2021 г. в озере Кызылташ, которое составило $1,39E+04$ Бк/л. Среднее значение среднемесячных ОА трития в безледоставный период в озере Кызылташ составило $1,57E+04$ Бк/л (при стандартном отклонении $1,1E+03$ Бк/л), что более чем в 2 раза превышало уровень вмешательства для питьевой воды, установленный НРБ-99/2009 (7600 Бк/л). При этом коэффициент вариации значений по месяцам не превышал 5%. Был выявлен тренд снижения среднемесячной ОА трития в озере Кызылташ от начала к концу безледоставного периода.

Ранее проведенными исследованиями также было установлено изменение ОА трития в озере Кызылташ в течение нескольких лет, однако в ходе этих иссле-

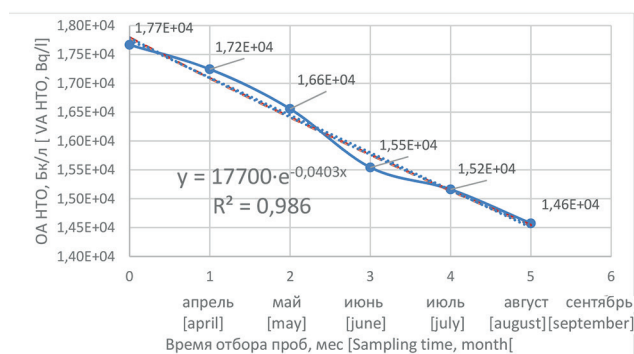


Рис. 2. Регрессионная модель и тренд снижения среднемесячной ОА трития в озере Кызылташ с апреля по сентябрь 2021 г.

[Fig. 2. Regression model and decreasing trend of monthly average tritium VA in the Kyzyltash lake from April to September 2021]

дований отбирались лишь единичные пробы в течение 1 года, что не позволяло выявить закономерности изменения ОА трития в водоеме с течением времени. Средние значения ОА трития и ошибка среднего ($n=11$) в озере Кызылташ за 2007–2009 гг. составляли 6730 ± 830 Бк/л [7]. Это статистически значимо в 2,3 меньше ($t = 7,2$, $p < 0,0001$) среднего значения ОА трития в озере Кызылташ в 2021 г. (15700 ± 884 Бк/л, $n=33$) ОА трития в единичной, отобранной нами пробе в 2015 г. составляла $\sim 11,2$ кБк/л [8].

Для определения поступления трития в атмосферу с поверхности озера Кызылташ в безледоставный период были использованы открытые данные ближайшей метеостанции, а именно среднемесячные температуры воздуха и среднемесячные показатели относительной влажности воздуха. На основании среднемесячных значений температуры, относительной влажности воздуха и формулы (1) были получены данные по испарению воды со всей поверхности озера Кызылташ по месяцам. Учитывая, что в апреле безледоставный период составил 1/3 месяца, расчет испаряемости и определение поступления трития в атмосферу проведен именно за этот период. При этом площадь озера принималась равной $\sim 19,47$ км² [2]. Объем испарившейся воды в месяц определяли по формуле:

$$V = S \times E_M \quad (2)$$

где:

V – объем испарившейся воды за месяц (тыс. м³/мес.);

S – площадь озера (км²);

E_M – испаряемость за месяц (мм/мес.).

Конечным результатом анализа являлось получение количественной оценки миграции трития с поверхности озера Кызылташ.

Таблица 1
Статистические характеристики ОА трития (Бк/л) в точках отбора проб в период с 10.06.2021 г. по 27.09.2021 г.

[Table 1

Statistical characteristics of tritium VA (Bq/l) in the sampling points]

Точка отбора проб [Sampling point]	Число наблюдений [Number of observations]	Среднее значение [Average value]	Минимум [Minimum]	Максимум [Maximum]	Стандартное отклонение [Standard deviation]
№1	14	$1,54E+04$	$1,32E+04$	$1,66E+04$	$8,33E+02$
№2	14	$1,55E+04$	$1,46E+04$	$1,65E+04$	$5,48E+02$

Полученные результаты поступления трития в атмосферу указывают на неравномерность его поступления в течение безледоставного периода по месяцам. Такая неравномерность обусловлена, в основном, относительной влажностью воздуха. Количественные показатели поступления трития в атмосферу напрямую оценивались как произведение объема испарившейся воды с поверхности водоема в определенный период времени и ОА трития в воде. Значения объемов испарения зависели от температуры и относительной влажности воздуха (табл. 2).

За 2021 г. год в безледоставный период поступление трития в атмосферу с поверхности озера Кызылташ составило около 196 ТБк при общем испарении воды с поверхности водоема в количестве ~12,2 млн м³. При сравнении с количеством выбросов трития в атмосферу предприятием ПО «Маяк» поступление трития с поверхности озера Кызылташ составило ~13% от выбросов в атмосферу в 2020 г. Поступление трития в атмосферу с озера Кызылташ в 2021 г. было на уровне значений выбросов, осуществляемых всеми предприятиями РФ, за исключением ПО «Маяк», в 2020 г. [6] (рис. 3).

Для моделирования миграции трития из озера Кызылташ, приняв за условие отсутствие сбросов радионуклида в данное озеро, изменение общей активности трития $A(t)$ и изменение объема воды $V(t)$ в безледоставный период 2021 г. можно в первом приближении представить в виде системы 2 дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dA}{dt} = -(\lambda + \gamma)A \\ \frac{dV}{dt} = \mu - \gamma V \end{cases} \quad (3)$$

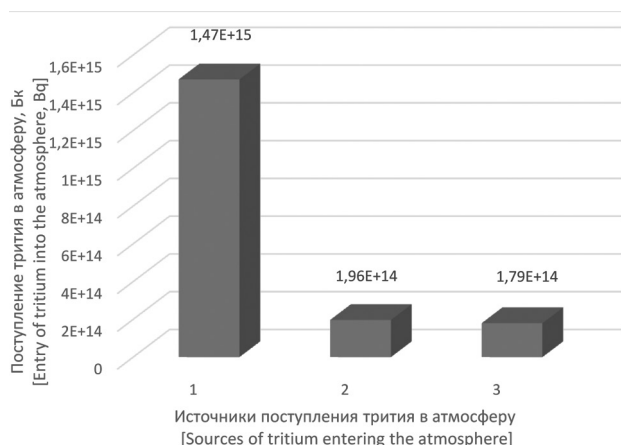


Рис. 3. Источники поступления трития в атмосферу:

1 – выбросы ПО «Маяк» в 2020 г., 2 – испарение с озера Кызылташ в 2021 г., 3 – суммарные выбросы трития предприятиями РФ в воздух, за исключением ПО «Маяк», в 2020 г., Бк

[Fig. 3. Sources of tritium in the atmosphere: 1 – Mayak PA releases in 2020, 2 – evaporation of lake Kyzyltash in 2021, 3 – total tritium releases from Russian facilities except Mayak PA in 2020, Bq]

где:

t – время, начиная с 27.04.2021 г., сут;

λ – постоянная радиоактивного распада трития, равная $1,54 \cdot 10^{-4}$ сут⁻¹ (связана с периодом полураспада 4500 сут = 12,32 года);

γ – скорость убывания активности трития, обусловленного убылью загрязнённой радионуклидом воды из озера («грязной» воды) за счёт испарения, инфильтрации в грунт и других процессов, сут⁻¹;

Таблица 2

Среднемесячные значения температуры воздуха и относительной влажности воздуха, количество испарившейся воды и поступление трития в атмосферу с поверхности озера Кызылташ в 2021 г.

[Table 2

Monthly average values of atmospheric temperature and relative air humidity, amount of evaporated water and atmospheric entry of tritium from lake Kyzyltash surface in 2021]

Месяц [Month]	Температура воздуха, °С [Air temperature, °C]	Относительная влажность воздуха, % [Relative humidity of the air, %]	Испарение, мм/мес. [Evaporation, mm/month]	Объем испарившейся воды, тыс. м ³ /мес. [The volume of evaporated water, thousand m ³ /month]	Поступление трития в атмосферу, Бк [Entry of tritium into the atmosphere, Bq]
Апрель [April]	6,7	47	95,9	622*	1,10E+13*
Май [May]	16,9	46	161,2	3138	5,41E+13
Июнь [June]	17,2	61	125,0	2434	4,03E+13
Июль [July]	18,1	72	93,6	1828	2,83E+13
Август [August]	18,9	67	115,0	2229	3,38E+13
Сентябрь [September]	10,2	70	66,9	1303	1,90E+13
Октябрь** [October**]	4,2	76	36,8	679	9,91E+12

* – рассчитано за период 1/3 месяца [Calculated for a period of 1/3 months].

** – расчетное значение [Calculated value].

μ – скорость поступления воды, не содержащей трития, в озеро («чистой» воды), л/сут.

Система (3) имеет следующее решение:

$$A(t) = A_0 e^{-(\lambda+\gamma)t} \quad (4)$$

$$V(t) = \frac{\mu}{\gamma} (1 - e^{-\gamma t}) + V_0 e^{-\gamma t} \quad (5)$$

где:

A_0 – начальное значение активности трития в озере,

Бк;

V_0 – начальное значение объёма воды в озере, л.

Активность трития в озере убывала по экспоненциально-убывающему закону. Оценка относительной скорости убывания воды в течение безледоставного периода только за счёт испарений составила $\gamma_{исп} = (12,2 \text{ млн м}^3) / (84 \text{ млн м}^3 \cdot 210 \text{ сут}) = 6,92 \cdot 10^{-4} \text{ сут}^{-1}$. Возможные 3 случая изменения объёма воды в озере Кызылташ при $V_0 = 8,4 \cdot 10^{10}$ л, вычисленные с помощью выражения (5), представлены на рисунке 4. В случае 1 уровень воды в озере стабилен и не изменяется с течением временем, при этом выполняется условие $\mu / \gamma_{исп} = V_0$. В случае 2 объём воды уменьшается из-за более низкой в 1,1 раза скорости пополнения воды, чем в случае 1. В случае 3 объём воды за счёт более высокой скорости пополнения, чем в случае 1 (также в 1,1 раза), наоборот, увеличивается.

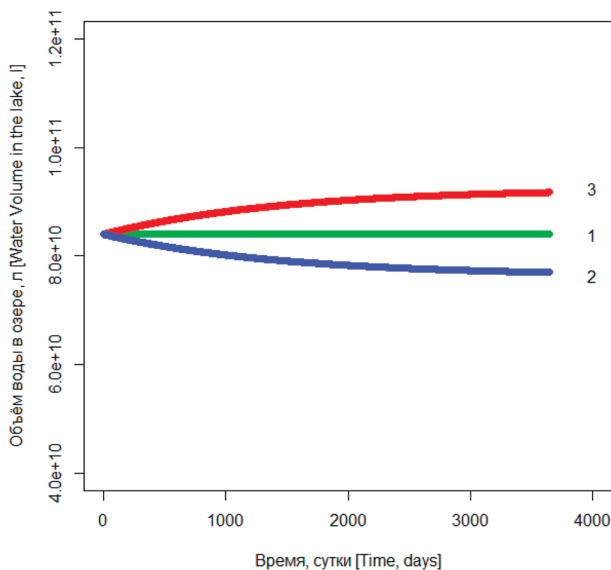


Рис. 4. Возможные случаи изменения объёма воды в озере Кызылташ при расходе, обусловленном только испарениями с поверхности в безледоставный период с относительной скоростью убывания при различных значениях абсолютной скорости прихода воды: 1 – без изменения, 2 – уменьшение, 3 – увеличение

[Fig. 4. Possible cases of variation of water volume in the Kyzyltash lake regarding water discharge related to evaporation from the water surface only in the ice-free period with relative decrease rate with various values of absolute rate of water inflow 1 – no changes, 2 – decrease, 3 – increase]

Таким образом, изменение объёмной активности трития в озере со временем может быть описано с помощью выражения:

$$C(t) = \frac{A(t)}{V(t)} = \frac{A_0 e^{-(\lambda+\gamma)t}}{\frac{\mu}{\gamma}(1 - e^{-\gamma t}) + V_0 e^{-\gamma t}} \quad (6)$$

Далее рассмотрим 2 случая. В первом случае, если начальное значение объёма воды равно равновесному значению, то объёмная активность трития в озере будет равна:

$$C(t) = C_0 e^{-(\lambda+\gamma)t} \quad (7)$$

где:

C_0 – начальное значение объёмной активности трития в озере, Бк/л.

Использование метода наименьших квадратов (МНК) на основе исходных данных по измерению ОА трития приводит к оценкам $C_0 = (1,771 \pm 0,020) \cdot 10^4$ Бк/л и $\gamma = (1,224 \pm 0,013) \cdot 10^{-3} \text{ сут}^{-1}$. Оценка полной скорости убывания, с учётом распада трития, равная $1,378 \cdot 10^{-3} \text{ сут}^{-1}$, согласуется с оценкой, полученной выше на основе среднемесячных уровней ОА радионуклида, равной $4,03 \cdot 10^{-2} \text{ мес}^{-1} \approx 1,34 \cdot 10^{-3} \text{ сут}^{-1}$ (см. рис. 2). Результат моделирования ОА трития в воде в течение времени с помощью экспоненциально-убывающей функции представлен на рисунке 5.

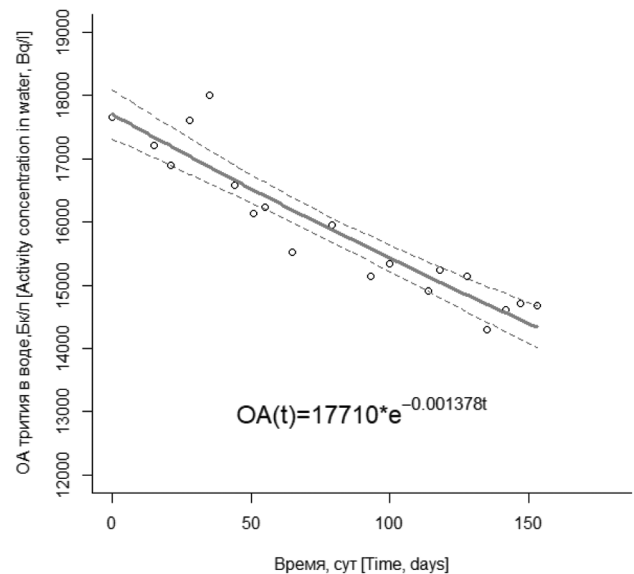


Рис. 5. Результат моделирования зависимости ОА трития в воде озера Кызылташ от времени в течение безледоставного периода 2021 г., с помощью экспоненциально убывающей функции с 95% доверительной областью

[Fig. 5. Result of modelling dependence of tritium VA in Kyzyltash lake water from time during the ice-free period in 2021 using the exponentially decreasing function with 95% confidence region]

При $V_0 = 84 \text{ млн м}^3$ начальное значение активности трития в озере составит $A_0 = 1,488 \cdot 10^{15}$ Бк, скорость поступления «чистой» воды будет равна $\mu = 1,028 \cdot 10^8$ л/сут. Тогда в течение безледоставного периода, равного 210 суток (7 месяцев), приходная часть водного баланса водоема («чи-

стой» воды) составит 21,6 млн м³. Ровно столько же составит расходная часть водного баланса («грязная» вода).

Во втором случае, отражающем реальную ситуацию в 2021 г., в озере происходило уменьшение объёма воды. Установлено, что сезонные колебания уровня воды для озера предгорья Южного Урала составляют от 25 до 40 см [3]. Для определения показателей водного баланса введём параметр δ , выраженный в долях, показывающий, насколько уменьшился первоначальный объём воды в течение 210 суток. При этом начальное значение объёма воды в озере V_0 и объёмная активность трития $C(t)$ в зависимости от параметров A_0 , μ и γ будут равны:

$$V_0 = \frac{\mu}{\gamma} \times \frac{1 - e^{-\gamma \times 210}}{1 - \delta - e^{-\gamma \times 210}} \quad (8)$$

$$C(t) = \frac{A_0/\mu e^{-(\lambda+\gamma)t}}{\frac{1}{\gamma} \left(1 - e^{-\gamma t} + \frac{1 - e^{-\gamma \times 210}}{1 - \delta - e^{-\gamma \times 210}} e^{-\gamma t} \right)} \quad (9)$$

На основе исходных данных об объёмной активности трития в озере с использованием МНК при $\delta=0,075$ были получены следующие оценки: $A_0/\mu = (1,492 \pm 0,142) \cdot 10^7$ Бк·сут/л, $\gamma = (1,607 \pm 0,013) \cdot 10^{-3}$ сут⁻¹. Скорость убывания «грязной» воды из озера была выше, чем в первом случае, следствием чего и стало падение уровня воды. Принимая, как и в первом случае, $V_0 = 8,4 \cdot 10^{10}$ л, получим оценку $\mu = 9,96 \cdot 10^7$ л/сут и равновесный объём озера, равный $\mu/\gamma = 6,6 \cdot 10^{10}$ л.

Тогда за 210 суток в озеро поступит $2,09 \cdot 10^{10}$ л «чистой» воды, а уйдёт на $0,075 \times 8,4 \cdot 10^{10} = 6,3 \cdot 10^9$ л больше, т.е. всего уйдёт $2,72 \cdot 10^{10}$ л «грязной» воды.

В таблице 3 представлен водный баланс и оценки его параметров для озера Кызылташ, полученные на основе динамики ОА трития и начального объёма $V_0 = 8,4 \cdot 10^{10}$ л в зависимости от параметра δ .

На рисунке 6 представлены зависимости параметров μ и γ от выбранного значения параметра δ . Регрессионный линейный анализ показал, что происходило уменьшение параметра μ при увеличении параметра δ , и наоборот – увеличение параметра γ . При этом относительное изменение параметра γ было выше (увеличился в 1,4 раза), чем относительное изменение параметра μ (уменьшился в 1,04 раза) при крайних значениях δ .

Полученные эмпирические данные и проведенные теоретические расчёты указывают на то, что расходная часть водного баланса водоема в безледоставный период больше его приходной части. Расходная часть водного баланса в 2021 г. только за счет испарения составила 12,2 млн м³, или 44,9% от общей, равной 27,2 млн м³ при $\delta = 0,075$. Остальная вода в объеме 15 млн м³ была использована для нужд предприятия ПО «Маяк» и инфильтрована в грунт, что характерно для горных озер [3]. Полученная модель позволила расширить область изучения гидродинамики различных типов водоемов [11, 14].

Заключение

В результате проведенных исследований по оценке уровня годового поступления трития в воздух с поверхности озера Кызылташ в современных условиях было установлено:

1. Среднее значение уровня ОА трития в озере Кызылташ за безледоставный период в 2021 г. более чем в 2 раза превышало уровень вмешательства по НРБ-99/2009.

Таблица 3

Водный баланс и оценки его параметров для озера Кызылташ, полученные на основе динамики ОА трития и начального объёма в зависимости от параметра δ

[Table 3

Water balance and estimates of its parameters for lake Kyzyltash obtained based of tritium VA dynamics and initial volume depending on parameter δ]

δ , доля [δ , fraction]	Подгонка МНК [Fitting LSM]		Оценка остальных параметров озера Кызылташ [Evaluation of the remaining parameters of the lake. Kyzyltash]				
	A_0/μ , Бк*сут/л [A_0/μ , Bq*d/l]	γ , сут [γ , d ⁻¹]	μ , л/сут [μ , l/d]	Равновесный объём, μ/γ , л [Equilibrium volume μ/γ , l]	Приход, л [Intake, l]	Расход, л [Removal, l]	Разница, л [Difference, l]
0	1,446E+07	1,224E-03	1,028E+08	8,400E+10	2,159E+10	2,159E+10	0,000E+00
0,01	1,452E+07	1,274E-03	1,025E+08	8,042E+10	2,152E+10	2,236E+10	-8,400E+08
0,02	1,458E+07	1,323E-03	1,020E+08	7,707E+10	2,141E+10	2,309E+10	-1,680E+09
0,03	1,464E+07	1,374E-03	1,016E+08	7,395E+10	2,134E+10	2,386E+10	-2,520E+09
0,04	1,470E+07	1,425E-03	1,012E+08	7,101E+10	2,125E+10	2,461E+10	-3,360E+09
0,05	1,476E+07	1,476E-03	1,007E+08	6,824E+10	2,115E+10	2,535E+10	-4,200E+09
0,06	1,482E+07	1,528E-03	1,003E+08	6,564E+10	2,106E+10	2,610E+10	-5,040E+09
0,07	1,488E+07	1,580E-03	9,982E+07	6,318E+10	2,096E+10	2,684E+10	-5,880E+09
0,08	1,495E+07	1,633E-03	9,937E+07	6,085E+10	2,087E+10	2,759E+10	-6,720E+09
0,09	1,501E+07	1,687E-03	9,896E+07	5,866E+10	2,078E+10	2,834E+10	-7,560E+09
0,10	1,508E+07	1,741E-03	9,849E+07	5,657E+10	2,068E+10	2,908E+10	-8,400E+09

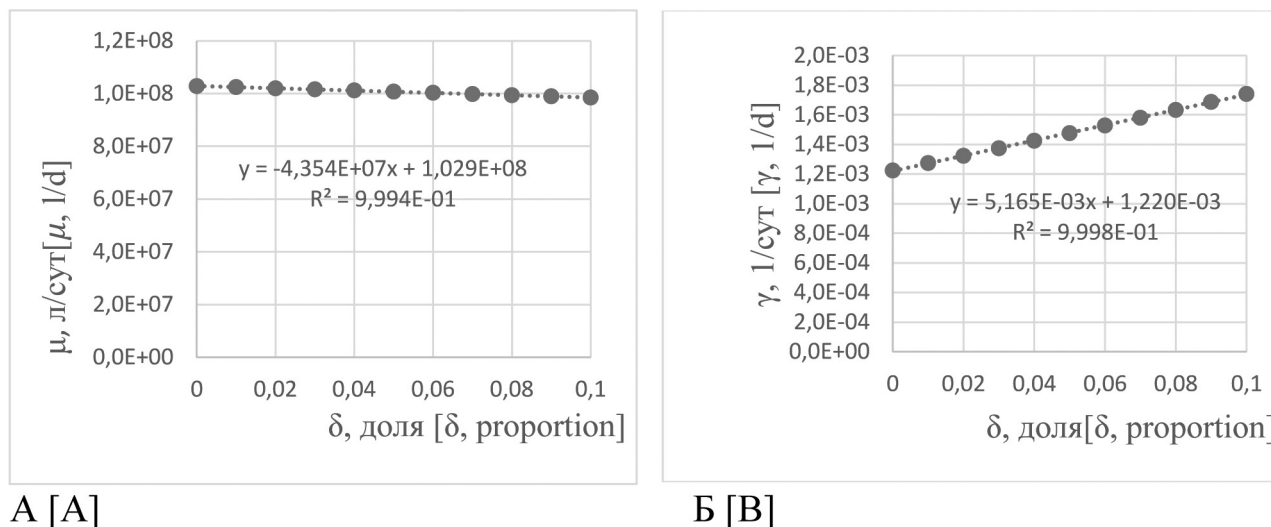


Рис. 6. Зависимость параметров и от значения параметра
[Fig. 6. Dependence of parameters and from parameter value]

2. Годовое поступление трития в воздух при испарении с озера Кызылташ составило 196 ТБк. Этот показатель на порядок ниже выбросов в атмосферу трития ПО «Маяк» (2020 г.) и близок к значениям суммарных выбросов всех остальных предприятий РФ, осуществляющих регламентируемые выбросы трития в атмосферу в 2020 г. (179 ТБк).

2. При неравномерном поступлении трития в атмосферу по месяцам максимальные значения были установлены в мае и июне 2021 г.

3. Наблюдался тренд снижения среднемесячной ОА трития в водоеме в безледоставный период.

4. Модель изменения уровня ОА трития в водоеме в зависимости от времени позволяет прогнозировать санитарно-гигиенические и гидрологические показатели водоема с позиции радиационной безопасности и рассчитывать водный баланс водоема в отдельные промежутки времени.

Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам за ценные замечания, которые способствовали улучшению качества публикации.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена в рамках Государственной программы Российской Федерации «Развитие здравоохранения» по контракту № 11.301.21.0 шифр «Кызылташ-21», финансируемому ФМБА России.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Востротин В.В.:

- существенный вклад в разработку концепции исследования; сбор, анализ и интерпретация данных;
- написание текста статьи и 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.

Янов А.Ю.:

- существенный вклад в разработку концепции исследования; сбор, анализ, интерпретация данных;
- написание текста статьи и ее редактирование для важного интеллектуального содержания;
- согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой части работы.

Литература

1. Сайт «Озёра России». URL: <https://ozera.info/lakes/about/gvr/list-lakes/kyzyl-tash> (Дата обращения 25.03.2022 г.)
2. Екидин А.А., Антонов П.Л., Жуковский М.В. Оценка загрязнения атмосферы тритием при испарении воды с поверхности промышленных водоемов // Вопросы радиационной безопасности. 2012. № 3. С. 3-10.
3. Андреева М.А. Озера среднего и Южного Урала. Челябинск, 1975. 270 с.
4. Толстикова В.С. Кузнецов В.Н. Ядерное наследие на Урале: исторические оценки и документы. Екатеринбург, 2017. 400 с.
5. Баторшин Г.Ш., Мокров Ю.Г., Алексахин А.И. Концепция вывода из эксплуатации водоемов-хранилищ ЖРО ФГУП «ПО «Маяк». VII Международный промышленный форум «АТОМЭКО – 2013». М., 2013.
6. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2020 г. Ежегодник. Обнинск, 2021. 239 с.
7. Чеботина М.Я., Николин О.А., Смагин А.И., Мурашова Е. Тритий в водоемах производственного и комплексного назначения в районе ПО «Маяк» на Урале // Водное хозяйство России. 2011. № 4. С. 75-84.
8. Vostrotin V.V., Yanov A.Y., Finashov L.V. Tritium in environmental objects in the area affected by FSUE Mayak Production

- Association in 2014-15 // Journal of Radiological Protection. 2021. Vol. 41, № 2. P. S56-S66. DOI 10.1088/1361-6498/abe8c8.
9. Иванов Н.Н. Об определении величины испаряемости // Известия Всесоюзного географического общества. 1954. Т. 86, № 2. вып. 1. С. 189–196.
10. Сайт компании ООО «Расписание Погоды». URL: <https://rp5.ru>. (Дата обращения 25.03.2022).
11. Busigin A., Kalyanam K.M., Sood S.K. Estimation of the tritium release rate from a spill of tritiated water // Fusion Technology. 1992. Vol. 21, No 2P2. P. 512-517. DOI: 10.13182/FST92-A29798.
12. Yoshinori S. Lake water mixing and tritium balance in lake Chuzenji // Geographical Review of Japan. 1983. Vol. 56-10. P. 667-678.

Поступила: 18.05.2022 г.

Востротин Вадим Владимирович – кандидат биологических наук; заведующий лабораторией радиационной безопасности, Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства России. **Адрес для переписки:** 456780, Россия, Челябинская область, Озёрск, Озёрское шоссе, д. 19; E-mail: vostrotin@subi.su

Янов Александр Юрьевич – кандидат биологических наук; научный сотрудник лаборатории радиационной безопасности, Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства России, Озёрск, Россия

Для цитирования: Востротин В.В., Янов А.Ю. Оценка уровня годового поступления трития в воздух с поверхности озера Кызылташ // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 88-96. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-88-96

Assessment of the level of annual intake of tritium into the air from the surface of the lake Kyzyltash

Vadim V. Vostrotin, Aleksandr Yu. Yanov

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

The paper presents the results of research of the levels of tritium volume activity in lake Kyzyltash, a water storage reservoir for liquid radioactive waste from Mayak Production Association. Insufficient knowledge of the ways of migration of tritium from the reservoir and their quantitative assessment in modern conditions does not allow to fully objectively assess and predict the impact of the object of “nuclear heritage” on the population of Ozersk and the environment. The research was aimed at obtaining scientific results, which will be the starting point for the formation of a tritium monitoring program for industrial reservoirs by Mayak Production Association. The purpose of the study was assessment of the dynamics of tritium volume activity in the lake Kyzyltash, assessment of water balance parameters and the level of tritium intake into the air from its surface during the ice-free period. A total of 33 water samples were collected. The average tritium volume activity in 2021 made $1,57E+04$ Bq/l, SD – $1,1E+03$ Bq/l that more than 2 times exceeds the intervention level. A trend of decrease in the average monthly tritium volume activity in the reservoir during the observation period was revealed. In the course of calculations, it was stated that in the course of evaporation during the ice-free period the 196 TBq of tritium entered the air from lake Kyzyltash surface that is comparable with releases from all the Russia facilities (179 TBq) except Mayak Production Association. The obtained values of evaporated tritium make 13% from atmospheric tritium releases of Mayak Production Association in 2020. A total of ~12,2 million m³ had evaporated from the water reservoir surface in the study period. The model of dependence of tritium volume activity from time in lake Kyzyltash in 2021 and using of exponentially decreasing function allowed defining water balance of lake Kyzyltash in the ice-free period with 6,3 million m³ deficiency. Research of the model parameters allow prediction of sanitary and hygienic characteristics of the water reservoir from the point of view of radiation safety and calculation of water balance of the reservoir in certain periods of time.

Key words: tritium, lake Kyzyltash, tritium migration, water balance, Mayak Production Association.

Vadim V. Vostrotin

Southern Urals Biophysics Institute

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

Information about the personal contribution of the authors to the work on the article

Vostrotin V.V.:

- significant contribution to the development of the research concept; data collection, analysis and interpretation;
- writing the text of the article and editing it for important intellectual content;
- approval of the final version of the article for publication;
- consent 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.

Yanov A.Yu.:

- significant contribution to the development of the research concept; data collection, analysis, interpretation;
- writing the text of the article and editing it for important intellectual content;
- consent 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.

Acknowledgment

The authors extend their deep gratitude to the reviewers for their valuable comments that contributed to improving the quality of the publication.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Funding

The work was carried out within the framework of the State Program of the Russian Federation “Development of Healthcare” under contract No. 11.301.21.0 cipher “Kyzyltash-21” funded by the FMBA of Russia.

References

1. The website of “Lakes of Russia”. Available on: <https://oz-era.info/lakes/about/gvr/list-lakes/kyzyl-tash> (Accessed 25.03.2022) (In Russian).
2. Ekin AA, Antonov PL, Zhukovsky MV. Assessment of tritium air pollution regarding evaporation of water from industrial reservoirs. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Radiation safety issues*. 2012;3: 3-10. (In Russian).
3. Andreevs MA. Lakes of Middle and Southern Urals. Chelyabinsk; 1975. 270 p. (In Russian).
4. Tolstikova VS, Kuznetsov VN. Nuclear heritage of the Urals: historical estimates and documents. Ekaterinburg; 2017. 400 p. (In Russian).
5. Batorshin GS, Mokrov YG, Aleksakhin AI. Conception of decommissioning water storage reservoirs with liquid radioactive waste of Mayak PA. VII International industrial forum “ATOMECO – 2013”. Moscow; 2013. (In Russian).
6. Radiation situation in Russia and neighbor countries in 2020. Annual publication. Obninsk; 2021. 239 p. (In Russian).
7. Chebotina MY, Nikolin OA, Smagin AI, Murashova E. Tritium in water reservoirs of production and complex purpose close to Mayak PA. *Vodnoe khozyaystvo Rossii = Water management of Russia*. 2011;4: 75-84. (In Russian).
8. Vostrotin VV, Yanov AY, Finashov LV. Tritium in environmental objects in the area affected by FSUE Mayak Production Association in 2014-15. *Journal of Radiological Protection*. 2021;41(2): S56-S66. DOI 10.1088/1361-6498/abe8c8.
9. Ivanov NN. On the determination of the evaporation rate. *Izvestiya Vsesoyuznogo geograficheskogo obshchestva = News of the All – Union Geographical Society*. 1954;2:86(1): 189–196. (In Russian).
10. Website “Weather Schedule”. Available on: <https://rp5.ru>. (Accessed 25.03.2022). (In Russian).
11. Busigin A, Kalyanam KM, Sood SK. Estimation of the tritium release rate from a spill of tritiated water. *Fusion Technology*. 1992;21(2P2): 512-517. DOI: 10.13182/FST92-A29798.
12. Yoshinori S. Lake water mixing and tritium balance in lake Chuzenji. *Geographical Review of Japan*. 1983;56-10: 667-678.

Received: May 18, 2022

For correspondence: Vadim V. Vostrotin – PhD, head of the laboratory of the radiation protection of Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency of Russia (Ozerskoe shosse, 19, Ozersk, 456780, Chelyabinsk region, Russia; E-mail: vostrotin@subi.su)

Aleksandr Yu. Yanov – PhD, Scientist, laboratory of radiation protection of Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency of Russia, Ozersk, Russia

For citation: Vostrotin V.V., Yanov A.Yu. Assessment of the level of annual intake of tritium into the air from the surface of the lake Kyzyltash. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 4. P. 88-96. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-88-96

Инкорпорирование трития культурами перца и баклажана при кратковременном воздействии окиси трития

Е.Н. Поливкина, Е.С. Сысоева, Е.В. Романенко, Л.Ф. Субботина, А.В. Паницкий, Ф.Ф. Жамалдинов, Л.Б. Кенжина

Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» Национального ядерного центра Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан

Растения являются ключевым звеном в процессе миграции трития как в экосистеме в целом, так и в трофической структуре в частности. Значительную часть трития растения в результате фотосинтеза включают в органическое вещество. В данном аспекте исследование процессов инкорпорирования трития и его возможного вклада в дозовую нагрузку на человека при поступлении внутрь с растениеводческой продукцией является актуальной задачей. Цель исследования заключалась в количественной оценке инкорпорирования трития широко культивируемыми культурами перца (*Capsicum annuum*) и баклажана (*Solanum melongena*) при кратковременном воздействии паров окиси трития в лабораторных и натуральных условиях. Для достижения данной цели проведено экспонирование предварительно выращенных в чистых условиях растений на стадии созревания в камере и натуральных условиях бывшего Семипалатинского испытательного полигона. Отбор воздуха производили с помощью коллектора трития «OS 1700». Подготовку растений для измерения органически-связанного трития выполняли с использованием установки «Sample Oxidizer». Активность трития в пробах измеряли на «QUANTULUS 1220». Установлено, что активность трития в свободной воде тканей листьев *Capsicum annuum* и *Solanum melongena* на 1–2 порядка выше, чем в стеблях и плодах. Разница между концентрацией трития в свободной воде тканей и органически связанным тритием во всех вариантах экспозиции составила также 1–2 порядка. Распределение трития в свободной воде тканей обеих культур при кратковременном воздействии окиси трития описывается убывающим рядом: «листья < стебли < плоды». Для органически-связанного трития не установлено четкой закономерности в распределении по органам, что, скорее всего, обусловлено коротким периодом экспозиции растений. К моменту полного созревания плодов наблюдается значительное снижение активности трития в свободной воде тканей (основного источника формирования органически связанного трития в постэкспозиционный период) во всех органах растений. Для органически связанного трития в листьях и стеблях отмечалось как повышение, так и снижение концентрации, а в созревших плодах она осталась практически на том же уровне, как в конце экспозиции. Скорость конверсии трития в органическую форму в натуральных условиях Семипалатинского испытательного полигона выше, чем в камере, в 15–30 раз, а транслокация органически связанного трития в съедобную часть овощных культур – в 2–4 раза, независимо от концентрации окиси трития в воздухе и листьях. Согласно результатам консервативной оценки, возможный вклад в дозу внутреннего облучения от перорального поступления трития при употреблении 1 кг овощей, загрязненных в результате кратковременного воздействия, исходя из абсолютной активности форм радионуклида в плодах *Capsicum annuum* и *Solanum melongena*, составит: для TCB – 0,7 и 5,6 нЗв; для органически связанного трития – 1,7 и 2,4 нЗв соответственно. Так как уровни окиси трития в выбросах предприятий ядерного топливного цикла значительно ниже по сравнению с экспериментальными, возможный вклад трития в дозу внутреннего облучения населения от перорального поступления с растениеводческой продукцией, подвергшейся кратковременному аэральному загрязнению радионуклидом, будет пренебрежимо мал.

Ключевые слова: тритий, окись трития, тритий свободной воды тканей, органически связанный тритий, скорость конверсии, индекс транслокации, вклад в дозовую нагрузку.

Введение

В настоящее время повышенные концентрации трития в окружающей среде, связанные с производством, обращением и утилизацией радиоактивной формы водо-

рода на ядерных объектах, вызывают большую озабоченность общественности, так как не существует эффективных способов для улавливания радионуклида. Тритий со сбросами и выбросами предприятий ядерного топливного цикла (ЯТЦ) поступает в водные и наземные экосисте-

Поливкина Елена Николаевна

Институт радиационной безопасности и экологии

Адрес для переписки: 071100, Республика Казахстан, Курчатов, ул. Бейбит-Атом, д. 2; E-mail: polivkina@nnc.kz

мы, а значит, и цепи питания, конечным звеном которых может являться человек [1].

Одна из ключевых ролей в переносе трития принадлежит растениям, которые способны поглощать его аэральным и корневым путями [2–5]. В результате идентичности химических свойств обычной (H_2O) и тритированной (НТО) воды данный радионуклид обладает высокой биодоступностью и легко вовлекается в процессы фотосинтеза, в результате которого инкорпорируется в органическое вещество [2–5]. В органически связанной форме тритий транслоцируется в съедобные части растений [6]. При этом органически связанный тритий (ОСТ), по сравнению с НТО, способен на длительное время задерживаться в составе клеточных структур [2–5]. Кроме того, дозовые коэффициенты для ОСТ примерно в 3 раза выше, чем для НТО [7, 8]. В связи с этим в последние несколько десятилетий значительное внимание уделяется исследованию процессов инкорпориования трития в органическое вещество [2–5] и его возможного вклада в дозовую нагрузку на человека при поступлении внутрь с продуктами питания [9, 10]. В данном аспекте исследование инкорпориования трития растениеводческой продукцией необходимо для оценки радиоэкологических рисков на импактных территориях предприятий ЯТЦ.

Цель исследования – количественная оценка инкорпориования трития овощными культурами перца (*Capsicum annuum*) и баклажана (*Solanum melongena*) при кратковременном воздействии паров НТО.

Задачи исследования

1. Определить количественные параметры инкорпориования трития (скорость конверсии, индекс транслокации) при аэральном поглощении НТО овощными культурами.

2. Дать оценку возможного вклада различных форм трития в дозу за счет потребления растениеводческой продукции, загрязненной в результате кратковременного выброса НТО.

Материалы и методы

Методология модельных экспериментов

В качестве экспериментальных растений выбраны перец (*Capsicum annuum*) и баклажан (*Solanum melongena*), которые культивируются повсеместно.

Сценарий кратковременного аварийного выброса трития для экспозиции растений воспроизводили парами НТО. Имитацию аэрального тритиевого загрязнения в лабораторных условиях проводили в камере, оборудованной системой фитоосвещения. На дно камеры помещали поддон с водой, концентрация НТО в которой составляла $(5,6 \times 10^4)$ Бк/л. Экспозицию НТО в натуральных условиях проводили на бывшей испытательной площадке «Дегелен» вблизи штольни, где проводились подземные ядерные испытания. Данная штольня, несмотря на консервацию портала, характеризуется наличием постоянного радиоактивного водотока с высокой концентрацией НТО как в воде, так и, соответственно, в приземном воздухе в результате эвапорации [11]. Длительность экспозиции растений составляла 6–8 ч. На время экспериментов почву в сосудах закрывали полиэтиленовой пленкой для исключения корневого поглощения трития. Для оцен-

ки концентрации соединений трития в урожае растения после экспозиции помещали в чистые условия в хорошо проветриваемое помещение и выдерживали 14 сут до полного созревания плодов, продолжая полив бидистиллированной водой.

Растения предварительно выращивали до стадии созревания в пластиковых вегетационных сосудах ($V=35$ л) на фоновой светло-каштановой суглинистой почве, в которую перед посевом вносили комплексные удобрения для обеспечения нормального роста и развития растений. Посев производили сухими семенами, схожими по размеру и массе, из расчета 2–3 проростка на 1 сосуд. Полив растений осуществляли бидистиллированной водой, поддерживая оптимальную влажность на уровне 60% от полной влагоемкости почвы.

Отбор проб растений проводили во время экспозиции (с интервалом 2 ч) и спустя 14 сут после экспозиции в трехкратной повторности с разделением на органы (листья, стебли, плоды). Масса каждого растительного образца в среднем составляла 100–150 г. Для предотвращения потери трития пробы растений немедленно упаковывали в зип-пакеты и помещали в морозильную камеру (-20°C). В натуральных условиях использовали портативный холодильник для транспортировки проб. Пробы воздуха отбирали с использованием тритиевого коллектора «OS 1700» (АМТЕК, США).

Контроль параметров

В течение экспериментов измеряли температуру, относительную влажность, атмосферное давление с использованием термогигрометра «ИВА-6» (Россия). Фотосинтетически активную радиацию (ФАР) оценивали путем пересчета Лк в мкмоль/с/м² [12].

Лабораторные анализы

Выделение свободной воды из растительных образцов для измерения активности ТСВ производили посредством специальной установки [13], при этом объем конденсата в среднем составлял 10–15 мл. После извлечения свободной воды пробы высушивали до постоянной массы и сжигали на установке «Sample Oxidizer» (PerkinElmer, США). Масса сжигаемого образца составляла 1–2 г. В воде, полученной после сжигания сухого растительного образца, измеряли удельную активность ОСТ.

Удельную активность трития измеряли методом жидкостно-сцинтилляционной спектрометрии с использованием спектрометра «QUANTULUS 1220» (Perkin Elmer, США) [14]. Предварительно перед измерением пробы фильтровали для удаления механических примесей, затем отбирали аликвоту объемом 3 мл в пластиковую вialу объемом 20 мл и добавляли сцинтилляционный коктейль Ultima Gold LLT для природных образцов (эффективность регистрации для трития в диапазоне 0–18 КэВ порядка 60%) в пропорции 1:4 (отношение «образец – сцинтиллятор»). Время измерения составляло не менее 120 мин, обработку бета-спектров и расчёт удельной активности трития проводили с использованием программы «Quanta Smart». Минимально-детектируемая активность трития составила 0,7 Бк/кг.

Объемную активность трития в каждой пробе воздуха определяли как среднее арифметическое из результатов измерений 3 счетных образцов, подготовленных из исходной пробы.

Камеральная обработка результатов

Скорость образования ОСТ рассчитывали согласно формуле [15]:

$$v \times C_{\text{ТСВ}} = (dC_{\text{ОСТ}}/dt) \times 100\% \quad (1)$$

где $C_{\text{ОСТ}}$ – активность ОСТ в листьях, Бк/кг; $C_{\text{ТСВ}}$ – активность ТСВ в листьях, Бк/кг; t – время наблюдений (экспозиции), ч; v – скорость конверсии трития, % ч⁻¹.

Транслокацию органических производных трития (TLI – translocation index) в съедобную часть растений оценивали по формуле [6]:

$$TLI = (C_{\text{ОСТ}} \text{ плод}) / (C_{\text{ТСВ}} \text{ в лист}) \times 100\% \quad (2)$$

где $C_{\text{ОСТ}}$ – удельная активность ОСТ в плодах, Бк/кг; $C_{\text{ТСВ}}$ – удельная активность ТСВ в листьях, Бк/кг.

Результаты и обсуждение

Инкорпорирование трития растениями при кратковременном аэральном воздействии НТО

Для проведения экспозиции выбрана стадия созревания как вариант наихудшего сценария, так как, согласно ранее проведенным исследованиям [16], концентрация ОСТ в урожае достигает максимума, когда растения подвергаются воздействию в период активного формирования плода по сравнению с результатами ближе к сбору урожая или на ранних стадиях развития растений.

Концентрация трития в экспериментальных растительных и воздушных образцах представлена в таблице 1.

Согласно полученным результатам, активность ТСВ в листьях *Capsicum annuum* в камере на порядок превы-

Таблица 1

[Table 1

Удельная активность трития в пробах

Tritium activity concentration in samples

Период [Period]	Удельная активность трития, Бк/кг [Tritium activity concentration, Bq/kg]						Объемная активность трития в воздухе, Бк/м ³ (Бк/л) [Tritium volumetric activity in the air, Bq/m ³]
	Листья [Leaves]		Стебли [Stems]		Плоды [Fruits]		
	ТСВ [TFWT]	ОСТ [OBT]	ТСВ [TFWT]	ОСТ [OBT]	ТСВ [TFWT]	ОСТ [OBT]	
<i>Capsicum annuum</i> (камерный эксперимент) [<i>Capsicum annuum</i> (chamber experiment)]							
2 ч [h]	2900±400	20±4,5	163±24	4,9±1,7	152 ±18	27±5	23±2,5
4 ч [h]	5000±800	21±4	450 ±75	4,2±1,7	240±40	17±4	27±2,5
6 ч [h]	8000±1200	47±7	895±130	8,7±2,7	545±80	20±4	55±5,5
14 сут после экспозиции [days after exposure]	333±55	59±7	220±32	37±5	390±45	–	< МДА
<i>Capsicum annuum</i> (полевой эксперимент) [<i>Capsicum annuum</i> (field experiment)]							
2 ч [h]	166±25	7±2,6	16±2,8	6,1±2,5	5±1	< МДА	7±1
4 ч [h]	182±34	22±6	30±6	5±2,6	6±1,1	14±4	11±1,1
6 ч [h]	284±40	17±4	19±3	7±3	14±2,2	11±3,5	21±2
8 ч [h]	235±30	21±5	20±2,2	10±3	9±1,7	9±3	13±1,3
14 сут после экспозиции [days after exposure]	4±3	5±3	< МДА	7±3	12±6	8±4	< МДА
<i>Solanum melongena</i> (камерный эксперимент) [<i>Solanum melongena</i> (chamber experiment)]							
2 ч [h]	1100±200	16±5	84±12	23±5	45±8	8±2,7	29±4,3
4 ч [h]	2400±400	42±9	280±45	19±5	106±15	14±4	66±10,0
6 ч [h]	4600±700	46±8	355±55	9±3	330±50	17±5	86±13,0
14 сут после экспозиции [days after exposure]	245±30	12±3	52±6	9±2	108±20	13±4	<МДА
<i>Solanum melongena</i> (полевой эксперимент) [<i>Solanum melongena</i> (field experiment)]							
4 ч [h]	1400±200	32±7	47±7	5,2±2,5	53±8	10±3	4±0,4
6 ч [h]	1190±140	–	33±4	14±4	60±13	14±4	54±5,5
8 ч [h]	1100±200	–	73±11	–	116±17	20±5	33±3,5
14 сут после экспозиции [days after exposure]	–	–	–	–	45±7	20±8	<МДА

«—» – данные отсутствуют [no data available]; МДА – минимально-детектируемая активность [detection limit]

шала активность ТСВ в натурном эксперименте, тогда как для культуры *Solanum melongena* концентрация отличалась всего от 1,3 до 4 раз, что, вероятно, обусловлено уровнями объемной активности НТО в воздухе при проведении экспозиций. Это подтверждает заметная (по шкале Чеддока) корреляционная зависимость ($r\text{-Spearman} = 0,61$ при $p < 0,05$) между концентрацией трития в воздухе и свободной воде тканей листьев.

Во всех вариантах экспозиции активность ТСВ листьев имела значения на 1–2 порядка выше, чем в других органах (стеблях, плодах), что, очевидно, обусловлено постоянной диффузией НТО с парами воды в мезофилл листа. Также активность ТСВ в большинстве случаев превышала на 1–2 порядка ОСТ, что согласуется с литературными данными [17–20] и объясняется механизмами инкорпорирования трития, среди которых приоритетная роль принадлежит фотосинтезу [2–5]. В целом, распределение радионуклида в свободной воде тканей органов можно представить убывающим рядом «листья < стебли < плоды». Распределение органически связанной формы радионуклида в растениях имело неоднозначный характер, что, вероятнее всего, обусловлено коротким периодом экспозиции, поскольку транспорт тритированных органических ассимилянтов из листьев является более длительным и физиологически зависимым процессом.

Через 14 сут после экспозиции (см. табл. 1) к моменту полного созревания плодов активность ТСВ, являющегося основным источником для формирования ОСТ, снизилась в листьях на 96%, в стеблях – на 87%, а в плодах – на 66%. При этом динамика концентрации ОСТ в листьях и стеблях имела как положительный, так и отрицательный характер, а в созревших плодах осталась практически на том же уровне, что и в конце экспозиции.

На основании полученных данных рассчитана скорость конверсии трития в органически связанную

форму (табл. 2). Согласно результатам камерных экспериментов, конверсия трития в листьях *Solanum melongena* в среднем в 2–3 раза интенсивнее по сравнению с *Capsicum annuum*.

На примере *Capsicum annuum* отмечено, что в натурном эксперименте скорость конверсии трития превышала аналогичные показатели в камере от 15 до 30 раз. При этом необходимо отметить, что во время экспозиции концентрация НТО в камере была в среднем 3,5 раза выше, чем в натурном эксперименте, а активность ТСВ листьев в камере – на порядок выше, чем в полевых условиях (см. табл. 1). Причина различий в скорости конверсии трития, вероятно, заключается в том, что данный процесс в большей степени зависит не от удельной активности ТСВ в ассимиляционной ткани листьев, а от интенсивности протекания фотосинтеза, в ходе которого формируется основная часть ОСТ [2–5].

Следует отметить, что во всех вариантах эксперимента установлен спад конверсии трития в конце экспозиции от 2 до 4 раз. Возможно, наблюдаемая динамика, во-первых, вызвана фотосинтетической депрессией вследствие изменения работы устьичного аппарата. Так, в работе [21] показано, что в середине дня повышение устьичного сопротивления приводит к более чем двукратному снижению интенсивности транспирации, которая, в свою очередь, влияет на скорость фотосинтеза. Экспонирование растений в данной работе проводилось в период с 10–11 ч утра до 16–18 ч вечера. Во-вторых, менее интенсивная конверсия трития в лабораторных условиях может быть обусловлена более низкой концентрацией CO_2 в камере.

Расчитан индекс транслокации, который показывает содержание ОСТ в плодах относительно концентрации ТСВ в листьях (рис.).

Согласно представленным данным, транслокация ОСТ в плоды в натуральных условиях от 2 до 4 раз интенсив-

Таблица 2

Скорость конверсии трития в листьях и условия экспозиции

[Table 2]

Conversion rate of tritium in leaves and exposure conditions]

Время, ч [Period, h]	<i>Capsicum annuum</i>				<i>Solanum melongena</i>			
	Камерный эксперимент [chamber experiment]							
	$\sigma, \% \text{ч}^{-1}$ [$\sigma, \% \text{h}^{-1}$]	$\phi, \%$	t, C°	PPDF, мкмоль/с/м ² [mmol/s/m ²]	$\sigma, \% \text{ч}^{-1}$ [$\sigma, \% \text{h}^{-1}$]	$\phi, \%$	t, C°	PPDF, мкмоль/с/м ² [mmol/s/m ²]
2	0,34	91	21	28	0,78	91	23	48
4	0,13	92	25	104	0,44	91	22	50
6	0,1	81	41	435	0,17	89	23	58
Полевой эксперимент [field experiment]								
2	–	80	23	668	2,3	31	23	1259
4	2,1	60	30	345	–	15	42	1020
6	3,0	65	29	220	–	19	33	644
8	1,0	60	24	260	–	31	24	603

«–» – данные отсутствуют [no data available].

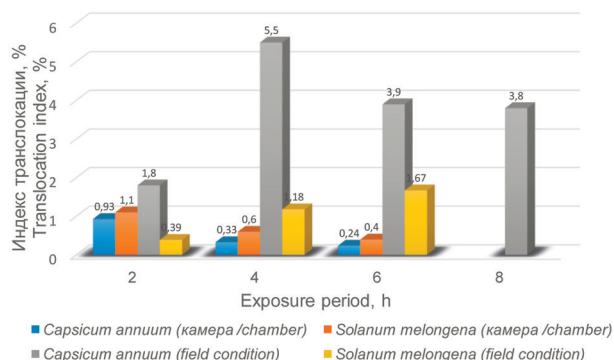


Рис. Индекс транслокации в конце экспозиции, %
[Fig. Translocation index at the end of exposure, %]

нее, чем в лабораторном эксперименте, что указывает на зависимость данного показателя в большей степени от скорости конверсии радионуклида, чем от активности ТСВ в листьях.

Оценка возможного вклада различных форм трития в дозу за счет потребления растениеводческой продукции, загрязненной в результате кратковременного выброса НТО

Органически связанная форма трития характеризуется более серьезными факторами риска, по сравнению с НТО. Во-первых, ОСТ может удерживаться в организме до 40 сут, тогда как период полувыведения НТО составляет около 10 дней (для взрослого человека) [8]. Во-вторых, если дозовый коэффициент для трития, поступившего с пищей в виде неорганических соединений (в нашем случае НТО в составе свободной воды тканей) составляет $4,8 \times 10^{-11}$ Зв/Бк, то для трития, поступившего с пищей в виде органических соединений (ОСТ), – $(1,2 \times 10^{-10})$ Зв/Бк [СП 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности» (НРБ-99/2009) утверждены ГГСВ РФ 07.07.09 г.]. Для консервативной оценки использовали данные, полученные в натуральных условиях с максимальными показателями инкорпорирования трития как вариант наихудшего сценария. Согласно расчетам, возможный вклад в дозу внутреннего облучения от перорального поступления трития при употреблении 1 кг овощей, загрязненных в результате кратковременного воздействия, исходя из абсолютной активности форм радионуклида в плодах *Capsicum annuum* и *Solanum melongena*, составит: для ТСВ – 0,7 и 5,6 нЗв; для ОСТ – 1,7 и 2,4 нЗв соответственно. Учитывая, что уровни НТО в выбросах предприятий ЯТЦ [22] на несколько порядков меньше по сравнению с экспериментальными, возможный вклад трития в дозу внутреннего облучения населения от перорального поступления с растениеводческой продукцией, подвергшейся кратковременному аэральному загрязнению радионуклидом, будет пренебрежимо мал.

Заключение

По результатам выполненных исследований дана количественная оценка инкорпорирования трития овощными культурами *Capsicum annuum* и *Solanum melongena* при кратковременном аэральном воздействии НТО в ла-

бораторном и натурном эксперименте. В целом, максимальная активность ТСВ наблюдается в листьях, а для ОСТ четкой закономерности распределения по органам не прослеживается в связи с коротким периодом экспозиции. Относительно органически связанной формы радионуклида концентрация его в свободной воде тканей органов растений выше на 1–2 порядка. Скорость конверсии трития и последующий процесс транслокации ОСТ в съедобную часть *Capsicum annuum* и *Solanum melongena* в натуральных условиях протекают значительно интенсивнее, чем в камере, независимо от концентрации НТО в воздухе и свободной воде листьев. Различия в инкорпорировании трития растениями указывают на зависимость данного процесса от целого комплекса физиологических и абиотических регуляторных механизмов основного биохимического «конвейера» формирования ОСТ – фотосинтеза.

К моменту полного созревания плодов наблюдается значительное снижение активности ТСВ (основного источника формирования ОСТ в постэкспозиционный период) во всех органах растений. Для ОСТ в листьях и стеблях отмечалось как повышение, так и снижение концентрации, а в созревших плодах она осталась практически на том же уровне, как в конце экспозиции.

Консервативная оценка возможного вклада в дозу внутреннего облучения населения при употреблении растениеводческой продукции, загрязненной в результате кратковременного аэрального выброса НТО, показала, что он будет пренебрежимо мал. Однако полученные закономерности инкорпорирования трития овощными культурами при кратковременном выбросе НТО могут учитываться при оценке радиозоологических рисков для сценариев аварийных ситуаций.

Информация о конфликте интересов

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

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Поливкина Е.Н. осуществляла общее руководство проектом, в рамках которого проведена представленная работа, непосредственно являлась организатором и руководителем экспериментальных работ в лабораторных и полевых условиях, провела отбор части проб растений, выполнила анализ литературных данных, анализ полученных результатов, подготовила первоначальный вариант рукописи, оформила окончательный вариант рукописи для публикации в журнале.

Сысоева Е.С. принимала участие в организации и проведении экспериментальных работ в полевых условиях, провела отбор части проб, выполнила анализ литературных данных, провела редактирование промежуточного варианта рукописи.

Романенко Е.В. выполнила бета-спектрометрический анализ проб на содержание ОСТ и НТО, выполнила интерпретацию результатов бета-спектрометрических измерений, оценку вклада форм трития в дозовую нагрузку при пероральном употреблении загрязненной растениеводческой продукции.

Субботина Л.Ф. выполнила подготовку растительных образцов для проведения бета-спектрометрических из-

мерений удельной активности трития в свободной воде тканей и органическом веществе растений.

Паницкий А.В. принимал участие в организации полевых работ, провел редактирование промежуточного варианта рукописи.

Жамалдинов Ф.Ф. осуществлял организацию работ по подготовке и проведению бета-спектрометрического анализа проб на содержание ОСТ и НТО, провел калибровку измерительной аппаратуры, провел редактирование промежуточного варианта рукописи.

Кенжина Л.Б. принимала участие в анализе литературных данных по оценке дозовых нагрузок на население, обусловленных потреблением продуктов, содержащих ОСТ и НТО, провела редактирование промежуточного варианта рукописи.

Благодарность

Авторы благодарят Иванову А.Р., Тимонову Л.В., Абдигамитова Б.Б., Томилова К.Е. (филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» Национального ядерного центра Республики Казахстан) и Пономареву Т.С. (Товарищество с ограниченной ответственностью «Экоэксперт») за помощь в организации и проведении лабораторных и полевых работ.

Сведения об источнике финансирования

Финансирование работы осуществлялось в рамках Бюджетной программы 217 «Развитие науки», подпрограммы 102 «Грантовое финансирование научных исследований» (Проект АП0808956713 «Исследование радиационно-гигиенической опасности техногенного трития при его накоплении растениеводческой продукцией для оценки дозовой нагрузки на население»).

Литература

- Weinberg A.M. The future of nuclear energy // *Physics Today*. 1981. Vol. 34, № 3. P. 48-56.
- Boyer C., Vichot L., Fromm M., et al. Tritium in plants: a review of current knowledge // *Environmental and Experimental Botany*. 2009. Vol. 67, No. 1. P. 34-51. DOI:10.1016/j.envexpbot.2009.06.008.
- Kim S.B., Baglan N., Davis P.A. Current understanding of organically bound tritium (OBT) in the environment // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2013. Vol. 126. P. 83-91. DOI:10.1016/j.jenvrad.2013.07.011.
- Melintescu A., Galeriu D. Uncertainty of current understanding regarding OBT formation in plants // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017. Vol. 167. P. 134-149. DOI:10.1016/j.jenvrad.2016.11.026.
- Erolle F., Ducros L., Séverine L.D., et al. An updated review on tritium in the environment // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018. Vol. 181. P. 128-137. DOI:10.1016/j.jenvrad.2017.11.001.
- Strack S., Diabat S., Muller J., et al. Organically bound tritium formation and translocation in crop plants, modelling and experimental results // *Fusion Science and Technology*. 1995. Vol. 28, No. 3. P. 951-956. DOI:10.13182/FST95-A30528.
- ICRP Publication 67 (Annals of the ICRP Vol. 23 No. 3/4) Age-dependent doses to members of the public from intakes of radionuclides: Part 2 ingestion dose coefficients international commission on radiological protection. Oxford: Elsevier science; 1993. 167 p.
- Балонов М.И., Чипига Л.А. Оценка дозы от поступления окиси трития в организм человека: роль включения трития в органическое вещество тканей // *Радиационная гигиена*. 2016. Т. 9, № 4. С. 16-25. DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-4-16-25.
- Hisamatsu S., Takizawa Y. Tritium transfer from diet to human // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 1995. Vol. 197, No. 2. P. 271-280. DOI:10.1007/bf02036005.
- Harrison J.D., Khurshed A., Lambert B.E. Uncertainties in dose coefficients for intakes of tritiated water and organically-bound forms of tritium by members of the public // *Radiation Protection Dosimetry*. 2008. No 98. P. 299-311.
- Lyakhova O.N., Lukashenko S.N., Larionova N.V., et al. Contamination mechanisms of air basin with tritium in venues of underground nuclear explosions at the former Semipalatinsk test site // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2012. Vol. 113. P. 98-107. DOI:10.1016/j.jenvrad.2012.02.010.
- Sharakshane A. Whole high-quality light environment for humans and plants // *Life Sciences in Space Research*. 2017. Vol. 15. P. 18-22. DOI:10.1016/j.lssr.2017.07.001.
- Лукашенко С.Н., Ларионова Н.В., Зарембо В.П. Инновационный патент РК. № 29721. Установка для извлечения воды из образцов // *Электронный бюллетень*. Астана, 2015. бюл. № 4. URL: <http://kzpatents.com/4-ip29721-ustrojstvo-dlya-izvlecheniya-vody-iz-obrazcov.html> (дата обращения 25.12.2019).
- Качество воды. Определение объёмной активности трития. Метод подсчёта сцинтилляций в жидкой среде. Международный стандарт ISO 9698:2019. Астана: «КазИнСт», 2019. 32 с.
- Atarashi-Andoh M., Amano H., Ichimasa M., et al. Conversion rate of HTO to OBT in plants // *Fusion Science Technology*. 2002. Vol. 41, No 3. P. 427-431. DOI:10.13182/FST02-A22625.
- Environmental Modelling for Radiation Safety (EMRAS) – A Summary Report of the Results of the EMRAS Programme (2003-2007)/ IAEA safety standards and related publications. Vienna, Austria: IAEA, 2012. 50 p.
- Choi Y.H., Lim K.M., Lee W.Y., et al. Tissue free water tritium and organically bound tritium in the rice plant acutely exposed to atmospheric HTO vapor under semi-outdoor conditions // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2002. No58. P. 67-85.
- Поливкина Е.Н., Ларионова Н.В., Ляхова О.Н. Оценка азрального поглощения НТО культурой *Helianthus Annuus* в условиях Семипалатинского испытательного полигона // *Радиация и риск*. 2020. Т. 29, № 1 С. 79-89. URL: http://radiation-and-risk.com/images/pdf/2020/1/1_Article_7_79-89.pdf. (дата обращения 25.12.2019).
- Polivkina Ye.N., Larionova N.V., Lukashenko S.N., et al. Assessment of the tritium distribution in the vegetation cover in the areas of underground nuclear explosions at the Semipalatinsk test site // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021. Vol. 237. P. 67-85. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2021.106705.
- Поливкина Е.Н., Ляхова О.Н., Ларионова Н.В., Субботина Л.Ф. Инкорпорирование трития культурой *Helianthus annuus* при корневом поступлении // *Вестник НЯЦ РК*. 2021. Т. 1. С. 48-53. DOI:10.52676/1729-7885-2021-1-48-53.
- Кособрюхов А.А. Активность фотосинтетического аппарата при периодическом повышении CO₂ // *Физиология растений*. 2009. Т. 56, № 1, С. 8-16.
- Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом». Изд. 2 / под общ. ред. И.И. Линге и И.И. Крышева. М.: Сам полиграфист, 2021. 555 с.

Поступила: 04.07.2022 г.

Поливкина Елена Николаевна – кандидат биологических наук, начальник лаборатории радиоэкологических исследований филиала «Институт радиационной безопасности и экологии» Национального ядерного центра Республики Казахстан.
Адрес для переписки: 071100, Республика Казахстан, г. Курчатов, ул. Бейбит-Атом, д.2; E-mail: polivkina@nnc.kz

Сысоева Елена Сергеевна – магистрант 2 курса Новосибирского государственного педагогического университета, специалист-эколог лаборатории радиоэкологических исследований филиала «Институт радиационной безопасности и экологии» Национального ядерного центра Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан

Романенко Екатерина Викторовна – магистрант 2 курса Томского политехнического университета, инженер лаборатории ядерно-физических методов анализа филиала «Институт радиационной безопасности и экологии» Национального ядерного центра Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан

Субботина Лилия Федоровна – инженер лаборатории радиоэкологических исследований филиала «Институт радиационной безопасности и экологии» Национального ядерного центра Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан

Паницкий Андрей Васильевич – кандидат биологических наук, ассоциированный профессор, начальник отдела комплексных исследований экосистем филиала «Институт радиационной безопасности и экологии» Национального ядерного центра Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан

Жамалдинов Фаиль Ферхатович – аспирант 2 курса Томского политехнического университета, начальник лаборатории ядерно-физических методов анализа филиала «Институт радиационной безопасности и экологии» Национального ядерного центра Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан

Кенжина Лаура Болатовна – кандидат медицинских наук, начальник лаборатории биодозиметрических исследований филиала «Институт радиационной безопасности и экологии» Национального ядерного центра Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан

Для цитирования: Поливкина Е.Н., Сысоева Е.С., Романенко Е.В., Субботина Л.Ф., Паницкий А.В., Жамалдинов Ф.Ф., Кенжина Л.Б. Инкорпорирование трития культурами перца и баклажана при кратковременном воздействии окиси трития // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 97-105. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-97-105

Incorporation of tritium by pepper and eggplant cultures with short-term exposure to tritium oxide

Elena N. Polivkina, Elena S. Sysoyeva, Ekaterina V. Romanenko, Liliya F. Subbotina, Andrey V. Panitskiy, Fail F. Zhamaldinov, Laura B. Kenzhina

Institute of Radiation Safety and Ecology of National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

*The article presents results of a study of tritium incorporation by vegetable crops with short-term aerial exposure to tritium oxide in laboratory and field conditions. Plants are a key link in the process of tritium migration both in the ecosystem as a whole and in the trophic structure in particular. As a result of photosynthesis, much of tritium is incorporated into the organic matter of plants. In this aspect, the study of tritium incorporation processes and its possible contribution to human radiation exposure from ingested crop products is a relevant task. The aim of the study was to assess tritium incorporation by vegetable crops quantitatively at aerial entry of the radionuclide in the form of tritium oxide. To achieve this goal, laboratory (in the chamber) and field (in the territory of the former Semipalatinsk Test Site) experiments were conducted with commonly cultivated pepper (*Capsicum annuum*) and eggplant (*Solanum melongena*) that were affected by short-term exposure to tritium oxide vapors. Air was sampled with a tritium collector "OS 1700". Plant samples for measuring organically bound tritium were prepared using a "Sample Oxidizer" unit. Tritium activity in samples was measured with "QUANTULUS 1220". It was found that tissue free water tritium activity in leaves of *Capsicum annuum* and *Solanum melongena* was 1-2 orders of magnitude higher than in stems and fruits. The distribution of tissue free water tritium in both crops with a short-term aerial exposure is described by a decreasing series: "leaves < stems < fruits". The difference between the tissue free water tritium and organically bound tritium concentration in plants for all exposure variants was also 1-2 orders of magnitude. For*

Elena N. Polivkina

Institute of Radiation Safety and Ecology

Address for correspondence: ul. Beybit-Atom, 2, Kurchatov 071100, Kazakhstan; E-mail: polivkina@nnc.kz

organically bound tritium, no distinct regularity in the distribution of plant parts was established, which is most likely due to the short period of exposure. By the time the fruits were fully ripe, a significant decrease in the activity of tissue free water tritium (the main source of the formation of organically bound tritium in the post-exposure period) in all plant parts was observed. For organically bound tritium, both an increase and a decrease in the concentration were noted in leaves and stems, and in ripe fruits it remained almost at the same level as at the end of the exposure. The conversion rate of tritium in field conditions was 15–30 times than in the chamber. Organically bound tritium translocation into edible parts of vegetable crops in field conditions was 2–4 times higher than in the chamber, regardless of the tritium oxide concentration in air and leaves. According to a conservative assessment, the possible contribution to the dose of internal exposure from ingested tritium per 1 kg of vegetables contaminated as a result of short-term exposure, based on the absolute activity of radionuclide forms in *Capsicum annuum* and *Solanum melongena* fruits will be: for tissue free water tritium – 0.7 and 5.6 nSv; for organically bound tritium – 1.7 and 2.4 nSv, respectively. Since the levels of tritium oxide in the emissions of nuclear fuel cycle enterprises are much lower compared to experimental ones, the possible contribution of tritium to the dose of public internal exposure from the ingestion with crop products after a short-term tritium oxide exposure will be negligible.

Key words: tritium, tritium oxide, tissue free water tritium, organically bound tritium, conversion rate, translocation index, contribution to radiation exposure.

Personal participation of authors

Polivkina E.N. was in charge of the general project management. She arranged and supervised the experimental work in vitro and, in the field, sampled a portion of plants, analyzed literature data and findings, prepared the original version of a manuscript, designed the final version of the manuscript to be published in the journal.

Sysoyeva E.S. was involved in managing the experimental work afield, sampled a portion of plants, analyzed literature data, edited the intermediate manuscript version.

Subbotina L.F. prepared plant samples for beta-spectrometric measurements of tissue free water tritium activity concentration and in the organic matter.

Zhamaldinov F.F. arranged activities on the beta-spectrometric sample analysis for the content of organically bound tritium and tritium oxide, calibrated the instrumentation, edited the intermediate manuscript version.

Romanenko E.E. carried out a beta-spectrometric analysis of samples for the content of organically bound tritium and tritium oxide, interpreted results of beta-spectrometric measurements, assessment of the contribution of tritium forms to the dose load during oral consumption of contaminated crop products.

Panitskiy A.V. was involved in arranging the field work, edited the intermediate manuscript version.

Kenzhina L.B. analyzed literature data on the assessment of public radiation exposure attributed to the consumption of foodstuffs containing organically bound tritium and tritium oxide, edited the intermediate manuscript version.

Acknowledgement

Authors appreciate Ivanova A.R., Timonova L.V., Tomilov K.E., Abdigamitov B.B. (branch “Institute of Radiation Safety and Ecology” National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan), and T.S. Ponomaryova (“Ecoekspert”) assistance in laboratory and field activities.

The conflict of interests

Authors state that the work and preparation of this article imply no conflict of interests whatsoever.

Sources of funding

The work was funded under the Budget program 217 «Scientific development», subprogram 102 «Grant funding of scientific research» (Project AP0808956713 «Research into radiological and hygienic hazard posed by man-made tritium when accumulated by crop products for assessing public radiation exposure»).

References

- Weinberg AM. The future of nuclear energy. *Physics Today*. 1981 Oct;34(3): 48–56.
- Boyer C, Vichot L, Fromm M, Losset Y. Tritium in plants: a review of current knowledge. *Environmental and Experimental Botany*. 2009 Nov;67(1):34–51. DOI:10.1016/j.envexpbot.2009.06.008.
- Kim SB, Baglan N, Davis PA. Current understanding of organically bound tritium (OBT) in the environment. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2013 Dec;126: 83–91. DOI:10.1016/j.jenvrad.2013.07.011.
- Melintescu A, Galeriu D. Uncertainty of current understanding regarding OBT formation in plants. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017 Feb;167: 134–149. DOI:10.1016/j.jenvrad.2016.11.026.
- Erolle F, Ducros L, Séverine LD, Beaugellin-Seiller K. An updated review on tritium in the environment. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018 Jan;181: 128–137. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.11.001.
- Strack S, Diabat S, Muller J, Rascob W. Organically bound tritium formation and translocation in crop plants, modelling and experimental results. *Fusion Science and Technology*. 1995 Aug;28(3): 951–956. DOI:10.13182/FST95-A30528.
- ICRP Publication 67 (Annals of the ICRP Vol. 23 No. 3/4) Age-dependent doses to members of the public from intakes of radionuclides: Part 2 Ingestion dose coefficients. International commission on radiological protection. Oxford: Elsevier Science; 1993. 167 p.
- Balonov MI, Chipiga LA. Assessment of the dose from the intake of tritium oxide into the human body: the role of tritium inclusion in the organic matter of tissues. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2016;9(4): 16–25. DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-4-16-25. (In Russian).
- Hisamatsu S, Takizawa Y. Tritium transfer from diet to human. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 1995 Nov;197(2): 271–280. DOI:10.1007/bf02036005.
- Harrison JD, Khursheed A, Lambert BE. Uncertainties in dose coefficients for intakes of tritiated water and organically-bound forms of tritium by members of the public. *Radiation*

- Protection Dosimetry*. 2002 Mar;98(3): 299-311. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a006722.
11. Lyakhova ON, Lukashenko SN, Larionova NV, Tur YS. Contamination mechanisms of air basin with tritium in venues of underground nuclear explosions at the former Semipalatinsk test site. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2012 Nov;113: 98-107. DOI:10.1016/j.jenvrad.2012.02.010.
 12. Sharakshane A. Whole high-quality light environment for humans and plants. *Life Sciences in Space Research*. 2017 Nov;15: 18-22. DOI: 10.1016/j.lssr.2017.07.001.
 13. Lukashenko SN, Larionova NV, Zarembo VP. Innovative patent of the Republic of Kazakhstan. № 29721. Bulletin No.: 4, 2015. Installation for extracting water from samples. Available from: <http://kzpatents.com/4-ip29721-ustrojstvo-dlya-izvlecheniya-vody-iz-obrazcov.html> (Date of application 25.12.2019) (Accessed April 15, 2015).
 14. Water quality. Determination of the volumetric activity of tritium. Method of counting scintillations in a liquid medium. International standard ISO 9698:2019. Astana: KazInSt; 2019. 32 p.
 15. Atarashi-Andoh M, Amano H, Ichimasa M, Ichimasa Y. Conversion rate of HTO to OBT in plants. *Fusion Science Technology*. 2002 Nov;41(3): 427-431. DOI:10.13182/FST02-A22625.
 16. Environmental Modelling for Radiation Safety (EMRAS) – A Summary Report of the Results of the EMRAS Programme (2003-2007). IAEA safety standards and related publications. Vienna, Austria: IAEA; 2012. 50 p.
 17. Choi YH, Lim KM, Lee WY, Diabaté S. Tissue free water tritium and organically bound tritium in the rice plant acutely exposed to atmospheric HTO vapor under semi-outdoor conditions. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2002 Jan;58(1): 67-85. DOI: 10.1016/s0265-931x(01)00024-8.
 18. Polivkina YeN, Larionova NV, Lyaxova ON. Assessment of aerosol uptake of HTO by *Helianthus Annuus* culture in the conditions of the Semipalatinsk test site. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2020;29(1):79-89. (In Russian).
 19. Polivkina YeN, Larionova NV, Lukashenko SN, Luakhova ON. Assessment of the tritium distribution in the vegetation cover in the areas of underground nuclear explosions at the Semipalatinsk test site. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021 Oct;237: 106705. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2021.106705.
 20. Polivkina YN, Lyakhova ON, Larionova NV, Subbotina LF. Incorporation of tritium by *Helianthus annuus* when entering through the roots. *Vestnik NYATS RK=NNC RK Bulletin*. 2021 Jun;(1): 48-53. (In Russian). DOI:10.52676/1729-7885-2021-1-48-53.
 21. Kosobryukhov AA. The activity of the photosynthetic apparatus with a periodic increase in CO₂. *Fiziologiya rasteniy = Plant physiology*. 2009;56(1): 8-16. (In Russian).
 22. Radioecological situation in the regions where enterprises are located State Atomic Energy Corporation "Rosatom". 2nd ed. Ed. by I.I. Linge and I.I. Krysheva. Moscow: Sam poligrafist; 2021. 555 p. (In Russian).

Received: July 04, 2022

For correspondence: Elena N. Polivkina – candidate of biological sciences, head of the Laboratory of Radioecological Research, Institute of Radiation Safety and Ecology of National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan (ul. Beybit-Atom, 2, Kurchatov 071100, Kazakhstan; E-mail: polivkina@nnc.kz)

Elena S. Sysoyeva – 2nd year Master's student (Novosibirsk State Pedagogical University), ecologist of the laboratory of radioecological research, Institute of Radiation Safety and Ecology of National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

Ekaterina V. Romanenko – 2nd year Master's student (Tomsk polytechnic university), engineer of the laboratory of nuclear physical methods of analysis, Institute of Radiation Safety and Ecology of National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

Liliya F. Subbotina – engineer of the laboratory of radioecological research, Institute of Radiation Safety and Ecology of National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

Andrey V. Panitskiy – PhD, associate professor, head of the department of integrated ecosystem research, Institute of Radiation Safety and Ecology of National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

Fail F. Zhamaldinov – 2nd year postgraduate student (Tomsk polytechnic university), head of the laboratory of nuclear physical methods of analysis, Institute of Radiation Safety and Ecology of National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

Laura B. Kenzhina – candidate of medical sciences, head of the laboratory of dosimetric research, Institute of Radiation Safety and Ecology of National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

For citation: Polivkina E.N., Sysoyeva E.S., Romanenko E.V., Subbotina L.F., Panitskiy A.V., Zhamaldinov F.F., Kenzhina L.B. Incorporation of tritium by pepper and eggplant cultures with short-term exposure to tritium oxide. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 4. P. 97-105. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-97-105

Облучение персонала и населения зон наблюдения радиационных объектов в 2021 году

А.Н. Барковский¹, Руслан Р. Ахматдинов¹, А.М. Библин¹, А.Г. Сивенков², А.Г. Цовьянов², В.Г. Журавлева², С.И. Кувшинников³, О.Е. Тутельян³

¹Санкт-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

²Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна, Москва, Россия

³Федеральный центр гигиены и эпидемиологии, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, Россия

В статье представлен анализ доз облучения населения зон наблюдения и персонала радиационных объектов Российской Федерации в 2021 г. Для проведения анализа использовались данные, поступившие в Федеральный банк данных по дозам облучения персонала, функционирующий в рамках Единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан. Использовались данные, поступившие от 20 359 радиационных объектов: 19 743 радиационных объектов, надзор за которыми осуществляет Роспотребнадзор, и 616 радиационных объектов, обслуживаемых Федеральным медико-биологическим агентством России. При этом 15 883 (78%) радиационных объектов являются медицинскими учреждениями. Всего в 2021 г. в Федеральный банк данных по дозам облучения персонала поступили результаты измерения годовых индивидуальных эффективных доз техногенного производственного облучения 239 743 человек персонала группы А и 22 490 человек персонала группы Б. При этом выявлено 12 095 человек персонала группы А, которые работают по совместительству на нескольких радиационных объектах. Средняя годовая эффективная доза техногенного производственного облучения персонала группы А в 2021 г. составила 1,12 мЗв, а персонала группы Б, дозы облучения которого получены по данным инструментального контроля, – 0,61 мЗв. Максимальные значения данной величины для персонала группы А в 2021 г. имели место в Забайкальском (2,81 мЗв) и в Пермском (2,60 мЗв) краях, в Ульяновской области (2,03 мЗв), в Ямало-Ненецком автономном округе (1,93 мЗв) и в Республике Бурятия (1,91 мЗв). Средняя индивидуальная годовая эффективная доза техногенного производственного облучения совместителей в 2021 г. составила 1,92 мЗв/год, что в 1,7 раза выше, чем для всего персонала группы А. В 2021 г. зарегистрировано 2 случая превышения годовой индивидуальной дозы 20 мЗв и 1 случай превышения годовой индивидуальной дозы 50 мЗв для персонала группы А, а также 15 случаев превышения годовой индивидуальной дозы 5 мЗв для персонала группы Б. Годовая индивидуальная доза техногенного производственного облучения 51,0 мЗв (превышающая предел дозы для персонала группы А) была зарегистрирована в Открытом акционерном обществе «Производственное объединение «Севмаш» Архангельской области. В зонах наблюдения радиационных объектов I категории потенциальной радиационной опасности в 2021 г. проживало 1,54 млн человек. Средняя годовая эффективная доза техногенного облучения данной категории населения за счет функционирования радиационных объектов составила 0,018 мЗв, что всего в 1,8 раза превышает годовую эффективную дозу 0,01 мЗв, соответствующую пренебрежимо малому радиационному риску, и в 55 раз меньше среднегодового предела дозы для населения, равного 1,0 мЗв. В целом, радиационная обстановка на радиационных объектах Российской Федерации достаточно стабильна и соответствует требованиям безопасности. Техногенное облучение населения и персонала за счет нормальной эксплуатации техногенных источников ионизирующего излучения является на сегодняшний день наименее значимым радиационным фактором, как в отношении индивидуальных доз облучения, так и в отношении коллективной дозы облучения населения Российской Федерации. Лишь менее 24 тыс. человек персонала группы А получили в 2021 г. индивидуальную годовую эффективную дозу техногенного производственного облучения, превышающую 2,0 мЗв, которая сравнима со средней годовой эффективной дозой природного облучения (3,36 мЗв), которую получает все население России. Коллективная годовая эффективная доза населения Российской Федерации за счет эксплуатации радиационных объектов в 2021 г. составила менее 0,1% дозы от всех источников.

Барковский Анатолий Николаевич

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

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

Ключевые слова: годовые эффективные дозы, техногенное производственное облучение, персонал, население зон наблюдения, Единая государственная система контроля и учета индивидуальных доз граждан.

Введение

Техногенное облучение населения и персонала за счет эксплуатации радиационных объектов, расположенных на территории Российской Федерации, вносит менее 0,1% в коллективную дозу облучения населения России [1]. Но именно этот вид облучения вызывает наибольшую тревогу у населения и чаще всего становится причиной проявлений радиофобии. С учетом важности дальнейшего развития радиационных технологий в энергетике, промышленности, медицине, науке, в сфере обеспечения неразрушающего контроля и безопасности, необходимо использовать все имеющиеся возможности для формирования адекватной оценки населением реальной радиационной опасности данного вида деятельности в сравнении с иными источниками радиационной и иной опасности для здоровья населения. Как показывает практика, наиболее действенным методом достижения этой цели является максимальная открытость в этой области и обеспечение регулярного освещения в открытых источниках данных о реальных уровнях облучения персонала и населения за счет эксплуатации радиационных объектов.

Материалы и методы

В настоящей статье представлены результаты анализа годовых эффективных доз техногенного облучения населения зон наблюдения и персонала радиационных объектов за счет их нормальной эксплуатации в 2021 г. При этом использовались данные, поступившие в Федеральный банк данных по дозам облучения персонала (ФБД ДОП), функционирующий в рамках Единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан (ЕСКИД). ФБД ДОП состоит из двух частей: ФБД ДОП Роспотребнадзора, функционирующий на базе ФБУЗ «Федеральный центр гигиены и эпидемиологии» Роспотребнадзора, и ФБД ДОП ФМБА России, функционирующий на базе ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России.

Результаты и обсуждение

В 2021 г. в Российской Федерации осуществляли деятельность с использованием техногенных ИИИ 19 743 радиационных объекта, надзор за которыми осуществляет Роспотребнадзор, и 616 радиационных объектов, обслуживаемых ФМБА России. Из них 15 620 радиационных объектов (79%), надзор за которыми осуществляет Роспотребнадзор, и 263 (43%) радиационных объекта, обслуживаемых ФМБА России, являются медицинскими учреждениями. Таким образом, количество радиационных объектов, данные об индивидуальных дозах техногенного производственного облучения персонала которых за 2021 г. поступили в ФБД ДОП, составило 20 359, из которых 15 883 (78%) – медицинские учреждения.

На рисунке 1 представлена информация о динамике количества радиационных объектов, представивших в ФБД ДОП информацию о дозах техногенного производственного облучения персонала [2–7]. Как видно, с

2016 по 2021 г. количество таких радиационных объектов выросло на 12% с 18 175 до 20 359.



Рис. 1. Динамика количества радиационных объектов, представивших в ФБД ДОП информацию по индивидуальным эффективным дозам техногенного производственного облучения персонала

[Fig. 1. Dynamics of number of organizations submitted in the Federal Data base information on individual effective doses of technogenic industrial exposure of personnel]

По данным радиационно-гигиенического паспорта Российской Федерации за 2021 г. [1], в Российской Федерации в 2021 г. деятельность с использованием техногенных ИИИ осуществляли также 1467 радиационных объектов Минобороны России, МВД России, ФСБ России, УДП России, ФСИН России и ВНГ России, из которых 623 (42%) являются медучреждениями. Таким образом, общее количество радиационных объектов, осуществлявших в 2021 г. на территории Российской Федерации деятельность с использованием техногенных ИИИ, составило 21 826, из которых 16 506 (76%) – медучреждения (табл. 1).

Численность персонала радиационных объектов, представивших данные за 2021 г. в ФБД ДОП Роспотребнадзора, составила 167 787 человек, из них 154 054 человека персонал группы А и 13 733 человека – персонал группы Б, дозы облучения которого были получены по данным инструментального контроля. Численность персонала радиационных объектов, представивших данные за 2021 г. в ФБД ДОП ФМБА России, составила 94 446 человек, из них 85 689 человек – персонал группы А и 8757 человек – персонал группы Б, дозы облучения которого были получены по данным инструментального контроля.

Таким образом, общая численность персонала, сведения о годовых индивидуальных эффективных дозах техногенного производственного облучения которого за 2021 г. поступили в ФБД ДОП, составила 262 233, из которых 239 743 человека – персонал группы А и 22 490 человек – персонал группы Б [7].

На рисунке 2 представлены данные о динамике численности персонала, данные о годовых индивидуальных эффективных дозах техногенного производственного облучения которого поступили в ФБД ДОП с 2016 по 2021 г. [2–7].

Таблица 1

Количество радиационных объектов, осуществлявших в 2021 г. деятельность с использованием техногенных ИИИ на территории Российской Федерации

[Table 1]

The number of radiation facilities, that carried out activities using technogenic radiation source in the territory of the Russian Federation in 2021]

	Количество радиационных объектов [Number of radiation facilities]		Численность персонала, чел. [Number of personal]		
	Всего, шт. [Total]	В том числе медучреждений [Including medical institutions]		Группа А [Group A]	Группа Б [Group B]
		шт.	%		
Роспотребнадзор [Rosпотребнадзор]	19 743	15 620	79	154 054	13 733
ФМБА России [FMBA of Russia]	616	263	43	85 689	8757
МО России [Russian Defense Ministry]	847	258	30	13 989	3760
МВД России [Ministry of Internal Affairs of Russia]	221	111	50	1154	116
ФСБ России [FSB of Russia]	266	133	50	1391	203
ФСИН России [FSIN of Russia]	69	69	100	1608	10
УДП России [Administrative Directorate of the President of the Russian Federation]	30	22	73	660	132
ВНГ России [The National Guard Forces Command of the Russian Federation]	34	30	88	181	3
ВСЕГО [Total]	21 826	16 506	76	258 726	26 714

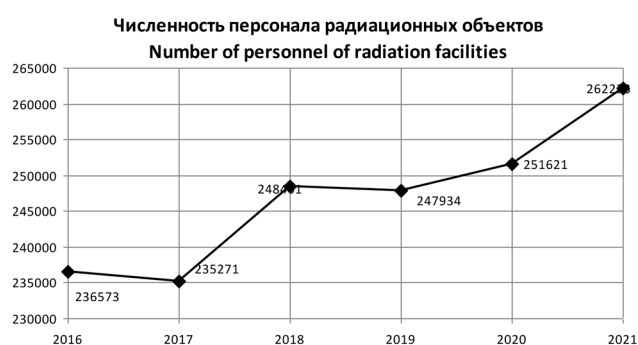


Рис. 2. Динамика численности персонала, данные о годовых индивидуальных эффективных дозах техногенного производственного облучения которого с 2016 по 2021 г. поступили в ФБД ДОП

[Fig. 2. Dynamics of the amount of personnel, for which the annual individual doses were submitted in Federal Data Base of personnel exposure doses from 2016 to 2021]

По данным радиационно-гигиенической паспортизации за 2021 г. [1], в Российской Федерации имеется также 18 983 человека персонала группы А и 4224 человека персонала группы Б, работающих на радиационных объектах МО России, МВД России, ФСБ России, ФСИН России, УДП России и ВНГ России, данные о которых не представлены в ФБД ДОП. Имеющиеся данные по этой категории персонала представлены в таблице 1. Таким

образом, общее количество персонала радиационных объектов, осуществлявших на территории Российской Федерации деятельность с использованием техногенных ИИИ в 2021 г., составило 285 440 человек, из которых 258 726 – персонал группы А и 26 714 – персонал группы Б.

В связи с тем, что некоторые лица из персонала работают по совместительству на нескольких радиационных объектах и учитываются в формах № 1-ДОЗ несколько раз, фактическая численность персонала, сведения о котором поступили в ФБД ДОП, несколько меньше указанных на рисунке 2 значений. В ФБД ДОП имеется возможность выявлять совместителей и вести учет их суммарных доз за счет работы на всех радиационных объектах. В 2021 г. было зарегистрировано 12 095 человек [7], совмещающих работу на нескольких радиационных объектах в качестве персонала группы А. На рисунке 3 показана динамика количества таких совместителей за период с 2016 по 2021 г. [2–7].

В 2021 г. из 167 787 человек персонала радиационных объектов, надзор за которыми осуществляет Роспотребнадзор, 75 474 (45%) – мужчины и 92 313 (55%) – женщины, а из 94 446 человек персонала радиационных объектов, обслуживаемых ФМБА России, 75 772 (80%) – мужчины и 18 674 (20%) – женщины (20%). Всего из 262 233 человек персонала, данные о котором за 2021 г. поступили в ФБД ДОП, 151 246 (58%) мужчин и 110 987 (42%) женщин. Т.е. процент женщин в составе

персонала группы А радиационных объектов достаточно высок, в основном, за счет медучреждений.

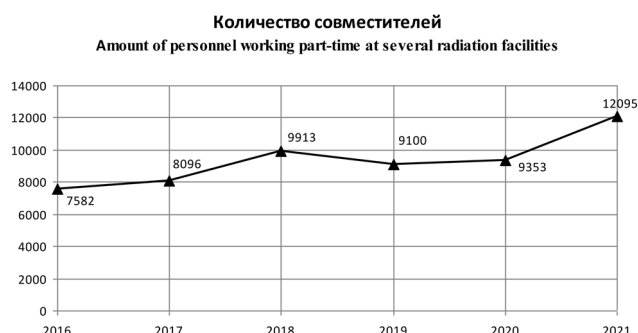


Рис. 3. Динамика численности персонала, совмещающего работу на нескольких радиационных объектах в качестве персонала группы А

[Fig. 3. Dynamics of the amount of personnel working part-time at several radiation facilities as the personnel group A]

По данным ФБД ДОП, коллективная годовая эффективная доза техногенного производственного облучения персонала за счет нормальной эксплуатации радиационных объектов в 2021 г. составила 281,7 чел.-Зв, из которых 267,9 чел.-Зв приходится на персонал группы А. Средняя индивидуальная годовая эффективная доза техногенного производственного облучения персонала группы А в 2021 г. составила 1,12 мЗв, а персонала группы Б, дозы облучения которого получены по данным инструментального контроля, – 0,61 мЗв. Анализ доз облучения, полученных совместителями, показал, что средняя индивидуальная годовая эффективная доза техногенного производственного облучения этой группы персонала в 2021 г. составила 1,92 мЗв/год, что в 1,7 раза выше, чем для всего персонала группы А. Но доз, превышающих 20 мЗв в год, в этой группе персонала в 2021 г. не зарегистрировано.

На рисунке 4 представлена динамика средних индивидуальных годовых эффективных доз техногенного производственного облучения персонала группы А и Б [2–7]. Как видно, данные величины достаточно стабильны и значительно меньше соответствующих среднегодовых пределов дозы для персонала, установленных НРБ-99/2009.

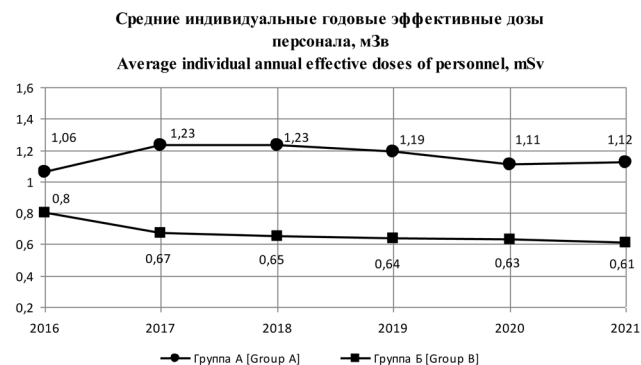


Рис. 4. Динамика средних индивидуальных годовых эффективных доз облучения персонала группы А и группы Б
[Fig. 4. Dynamics of the average individual annual effective doses of personnel group A and group B]

Распределение средних по субъектам Российской Федерации годовых индивидуальных эффективных доз техногенного производственного облучения персонала группы А представлено в таблице 2, а персонала группы Б – в таблице 3 [7].

Как видно из представленных данных, средние по субъектам Российской Федерации индивидуальные годовые эффективные дозы техногенного производственного облучения персонала радиационных объектов во всех субъектах Российской Федерации в 2021 г. были существенно ниже основных пределов дозы. Максимальные значения данной величины для персонала группы А в 2021 г. имели место в Забайкальском (2,81 мЗв) и в Пермском (2,60 мЗв) краях, в Ульяновской области (2,03 мЗв), в Ямало-Ненецком автономном округе (1,93 мЗв) и в Республике Бурятия (1,91 мЗв). Все эти дозы меньше средней индивидуальной годовой эффективной дозы природного облучения населения Российской Федерации, равной 3,36 мЗв, которому подвергается все население Российской Федерации. В то же время численность персонала группы А в 2021 г. не превышала 260 тыс. человек, что составляет всего 0,18% от численности населения России, а годовые индивидуальные дозы техногенного производственного облучения, превышающие 2,0 мЗв, в 2021 г. получили менее 24 тыс. человек.

Тем не менее, в 2021 г. зарегистрировано 2 случая превышения годовой индивидуальной дозы 20 мЗв и 1 случай превышения годовой индивидуальной дозы 50 мЗв для персонала группы А и 15 случаев превышения годовой индивидуальной дозы 5 мЗв для персонала группы Б. Годовая индивидуальная доза техногенного производственного облучения 51,0 мЗв (превышающая предел дозы для персонала группы А) была зарегистрирована в ОАО «ПО «Севмаш»» Архангельской области.

В таблице 4 представлены сведения об учреждениях, в которых в 2021 г. персоналом группы Б были получены дозы, превышающие 5 мЗв.

Данные о количестве случаев превышения среднегодового предела дозы для персонала группы А (20 мЗв) и персонала группы Б (5 мЗв) в период с 2016 по 2021 г. представлены на рисунке 5 [2–7].

Количество превышений среднегодового предела дозы
The number of exceedances of the average annual dose limit

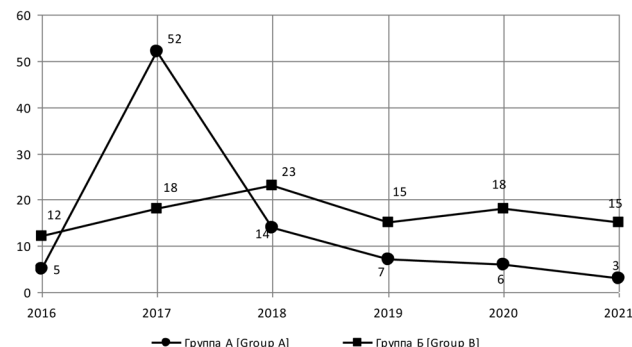


Рис. 5. Динамика количества лиц из персонала с годовой индивидуальной дозой техногенного производственного облучения более 20 мЗв для персонала группы А и более 5 мЗв для персонала группы Б
[Fig. 5. The number of personnel with an annual individual effective dose of technogenic exposure of more than 20 mSv for the personnel group A and more than 5 mSv for the personnel group B]

Таблица 2

Распределение численности персонала группы А по диапазонам индивидуальных годовых эффективных доз техногенного производственного облучения за счет нормальной эксплуатации техногенных ИИИ в субъектах Российской Федерации в 2021 г.

[Table 2

Distribution of the number of group A personnel by ranges of individual annual effective doses of occupational exposure due to the normal operation of artificial sources of radiation in the subjects of the Russian Federation in 2021]

Наименование субъекта РФ [Subject of the RF]	Численность персонала, чел. [Number of personnel]	Диапазон индивидуальных доз, мЗв [Range of individual doses, mSv]					СИД*, мЗв [Average individual dose, mSv]
		0–2	2–5	5–20	20–50	>50	
Республика Адыгея [Republic of Adygea]	262	251	11	0	0	0	0,50
Республика Башкортостан [Republic of Bashkortostan]	3557	3416	113	28	0	0	0,74
Республика Бурятия [Republic of Buryatia]	852	575	236	41	0	0	1,91
Республика Алтай [Altai Republic]	127	120	7	0	0	0	0,95
Республика Дагестан [Republic of Dagestan]	1013	918	90	5	0	0	1,01
Республика Ингушетия [Republic of Ingushetia]	226	180	43	3	0	0	0,97
Кабардино-Балкарская Республика [Kabardino-Balkar Republic]	402	390	12	0	0	0	0,65
Республика Калмыкия [Republic of Kalmykia]	203	169	34	0	0	0	1,22
Карачаево-Черкесская Республика [Karachay-Cherkess Republic]	211	207	4	0	0	0	0,88
Республика Карелия [Republic of Karelia]	682	670	12	0	0	0	0,69
Республика Коми [Komi Republic]	1134	1031	65	38	0	0	1,18
Республика Марий Эл [Mari El Republic]	456	450	6	0	0	0	0,74
Республика Мордовия [Republic of Mordovia]	553	480	32	41	0	0	0,98
Республика Саха (Якутия) [Sakha Republic]	1 572	1471	94	7	0	0	0,97
Республика Северная Осетия – Алания [Republic of North Ossetia–Alania]	495	422	73	0	0	0	1,28
Республика Татарстан [Republic of Tatarstan]	5543	5426	99	18	0	0	0,73
Республика Тыва [Tuva Republic]	203	184	13	6	0	0	1,21
Удмуртская Республика [Udmurt Republic]	2429	2126	275	28	0	0	1,29
Республика Хакасия [Republic of Khakassia]	389	387	2	0	0	0	0,37
Чеченская Республика [Chechen Republic]	331	296	32	3	0	0	0,91
Чувашская Республика [Chuvash Republic]	732	711	19	2	0	0	0,86
Алтайский край [Altai Krai]	1783	1763	19	1	0	0	0,73
Краснодарский край [Krasnodar Krai]	4373	4181	162	30	0	0	0,73
Красноярский край [Krasnoyarsk Krai]	6338	6007	244	87	0	0	0,83

Наименование субъекта РФ [Subject of the RF]	Численность персонала, чел. [Number of personnel]	Диапазон индивидуальных доз, мЗв [Range of individual doses, mSv]					СИД*, мЗв [Average individual dose, mSv]
		0-2	2-5	5-20	20-50	>50	
Приморский край [Primorsky Krai]	3597	2605	72	15	0	0	0,94
Ставропольский край [Stavropol Krai]	2068	1900	151	17	0	0	0,98
Хабаровский край [Khabarovsk Krai]	1515	1380	120	15	0	0	1,09
Амурская область [Amur Oblast]	734	605	128	1	0	0	1,24
Архангельская область [Arkhangelsk Oblast]	5 980	5482	414	82	1	1	1,01
Астраханская область [Astrakhan Oblast]	1061	1005	41	15	0	0	0,69
Белгородская область [Belgorod Oblast]	1410	1377	28	4	1	0	0,62
Брянская область [Bryansk Oblast]	1035	1034	1	0	0	0	0,65
Владимирская область [Vladimir Oblast]	896	848	45	3	0	0	0,73
Волгоградская область [Volgograd Oblast]	2349	2301	26	22	0	0	0,74
Вологодская область [Vologda Oblast]	913	783	123	7	0	0	1,36
Воронежская область [Voronezh Oblast]	5269	4946	225	98	0	0	0,58
Ивановская область [Ivanovo Oblast]	774	772	2	0	0	0	0,56
Иркутская область [Irkutsk Oblast]	3020	2586	381	53	0	0	1,41
Калининградская область [Kaliningrad Oblast]	1308	1198	96	14	0	0	0,76
Калужская область [Kaluga Oblast]	1927	1384	390	153	0	0	1,84
Камчатский край [Kamchatka Krai]	553	504	46	3	0	0	0,86
Кемеровская область [Kemerovo Oblast]	2231	1927	293	11	0	0	1,19
Кировская область [Kirov Oblast]	1136	1113	18	5	0	0	0,67
Костромская область [Kostroma Oblast]	365	347	18	0	0	0	0,80
Курганская область [Kurgan Oblast]	866	862	3	1	0	0	0,65
Курская область [Kursk Oblast]	5361	4140	717	504	0	0	1,84
Ленинградская область [Leningrad Oblast]	8392	6800	967	625	0	0	1,52
Липецкая область [Lipetsk Oblast]	1107	1087	20	0	0	0	0,65
Магаданская область [Magadan Oblast]	210	208	2	0	0	0	0,65
Московская область [Moscow Oblast]	15 522	15031	417	74	0	0	0,81

Наименование субъекта РФ [Subject of the RF]	Численность персонала, чел. [Number of personnel]	Диапазон индивидуальных доз, мЗв [Range of individual doses, mSv]					СИД*, мЗв [Average individual dose, mSv]
		0–2	2–5	5–20	20–50	>50	
Мурманская область [Murmansk Oblast]	4886	4224	477	185	0	0	0,95
Нижегородская область [Nizhny Novgorod Oblast]	6235	6187	45	3	0	0	0,45
Новгородская область [Novgorod Oblast]	510	469	40	1	0	0	1,40
Новосибирская область [Novosibirsk Oblast]	3815	3564	241	10	0	0	0,90
Омская область [Omsk Oblast]	1741	1601	137	3	0	0	1,15
Оренбургская область [Orenburg Oblast]	1541	1136	361	44	0	0	1,69
Орловская область [Oryol Oblast]	622	492	118	12	0	0	1,47
Пензенская область [Penza Oblast]	1020	950	60	10	0	0	1,15
Пермский край [Perm Krai]	3503	2766	189	548	0	0	2,60
Псковская область [Pskov Oblast]	519	424	94	1	0	0	1,42
Ростовская область [Rostov Oblast]	7437	7014	303	120	0	0	0,77
Рязанская область [Ryazan Oblast]	1038	982	53	3	0	0	0,87
Самарская область [Samara Oblast]	3332	3265	54	13	0	0	0,86
Саратовская область [Saratov Oblast]	4871	4531	224	116	0	0	0,65
Сахалинская область [Sakhalin Oblast]	776	690	70	16	0	0	1,00
Свердловская область [Sverdlovsk Oblast]	10 823	9964	557	302	0	0	0,89
Смоленская область [Smolensk Oblast]	4773	3589	918	266	0	0	1,71
Тамбовская область [Tambov Oblast]	600	545	54	1	0	0	0,68
Тверская область [Tver Oblast]	3472	3235	172	65	0	0	0,58
Томская область [Tomsk Oblast]	4318	3800	366	152	0	0	1,17
Тульская область [Tula Oblast]	1384	1302	43	39	0	0	1,06
Тюменская область [Tyumen Oblast]	1585	1493	83	9	0	0	0,93
Ульяновская область [Ulyanovsk Oblast]	3 199	2500	362	337	0	0	2,03
Челябинская область [Chelyabinsk Oblast]	12 949	9601	2683	665	0	0	1,70
Забайкальский край [Zabaykalsky Krai]	3589	2334	744	511	0	0	2,81
Ярославская область [Yaroslavl Oblast]	981	930	42	9	0	0	0,76

Наименование субъекта РФ [Subject of the RF]	Численность персонала, чел. [Number of personnel]	Диапазон индивидуальных доз, мЗв [Range of individual doses, mSv]					СИД*, мЗв [Average individual dose, mSv]
		0-2	2-5	5-20	20-50	>50	
Москва [Moscow]	25 865	24886	787	192	0	0	1,08
Санкт-Петербург [Saint Petersburg]	12 377	11545	649	183	0	0	1,33
Еврейская автономная область [Jewish Autonomous Oblast]	103	102	1	0	0	0	0,51
Республика Крым [Republic of Crimea]	1172	1148	24	0	0	0	0,76
Ненецкий автономный округ [Nenets Autonomous Okrug]	160	150	9	1	0	0	0,76
Ханты-Мансийский автономный округ – Югра [Khanty-Mansi Autonomous Okrug–Yugra]	4851	4001	641	209	0	0	1,35
Чукотский автономный округ [Chukotka Autonomous Okrug]	993	800	103	90	0	0	1,59
Ямало-Ненецкий автономный округ [Yamalo-Nenets Autonomous Okrug]	1766	1309	319	138	0	0	1,93
Севастополь [Sevastopol]	377	374	2	1	0	0	0,55
Всего по РФ [Total in Russia]	239 743	215 959	17 466	6 315	2	1	1,12
Вклад % [Contribution%]		90,08	7,29	2,63	0,0	0,0	

* – средняя по субъекту Российской Федерации индивидуальная годовая эффективная доза техногенного производственного облучения персонала группы А [* – The average individual annual effective dose of technogenic industrial exposure of group A personnel for the subject of the Russian Federation].

Таблица 3

Распределение численности персонала группы Б по диапазонам индивидуальных годовых эффективных доз техногенного производственного облучения за счет нормальной эксплуатации техногенных ИИИ в субъектах Российской Федерации в 2021 г.

[Table 3

Distribution of the number of group B personnel by ranges of individual annual effective doses of occupational exposure due to the normal operation of artificial sources of radiation in the subjects of the Russian Federation in 2021]

Наименование субъекта РФ [Subject of the RF]	Численность персонала, чел. [Number of personnel]	Диапазон индивидуальных доз, мЗв [Range of individual doses, mSv]					СИД*, мЗв [Average individual dose, mSv]
		0-1	1-2	2-5	5-12,5	>12,5	
Республика Адыгея [Republic of Adygea]	44	34	10	–	–	–	0,51
Республика Башкортостан [Republic of Bashkortostan]	669	601	61	7	–	–	0,42
Республика Бурятия [Republic of Buryatia]	68	30	30	8	–	–	1,32
Республика Алтай [Altai Republic]	15	9	5	1	–	–	0,96
Республика Дагестан [Republic of Dagestan]	10	9	1	–	–	–	0,62
Республика Ингушетия [Republic of Ingushetia]	9	9	–	–	–	–	0,37
Кабардино-Балкарская Республика [Kabardino-Balkar Republic]	43	22	21	–	–	–	0,89
Республика Калмыкия [Republic of Kalmykia]	4	2	2	–	–	–	0,60

Наименование субъекта РФ [Subject of the RF]	Численность персонала, чел. [Number of personnel]	Диапазон индивидуальных доз, мЗв [Range of individual doses, mSv]					СИД*, мЗв [Average individual dose, mSv]
		0–1	1–2	2–5	5–12,5	>12,5	
Карачаево-Черкесская Республика [Karachay-Cherkess Republic]	61	55	6	–	–	–	0,59
Республика Карелия [Republic of Karelia]	102	100	–	2	–	–	0,44
Республика Коми [Komi Republic]	58	47	10	1	–	–	0,77
Республика Марий Эл [Mari El Republic]	58	50	7	1	–	–	0,74
Республика Мордовия [Republic of Mordovia]	42	24	18	–	–	–	0,88
Республика Саха (Якутия) [Sakha Republic]	70	68	1	1	–	–	0,22
Республика Северная Осетия – Алания [Republic of North Ossetia–Alania]	–	–	–	–	–	–	–
Республика Татарстан [Republic of Tatarstan]	371	358	13	–	–	–	0,54
Республика Тыва [Tuva Republic]	30	27	3	–	–	–	0,85
Удмуртская Республика [Udmurt Republic]	234	206	21	7	–	–	0,41
Республика Хакасия [Republic of Khakassia]	5	5	–	–	–	–	0,11
Чеченская Республика [Chechen Republic]	21	19	2	–	–	–	0,55
Чувашская Республика [Chuvash Republic]	40	14	26	–	–	–	1,01
Алтайский край [Altai Krai]	88	81	7	–	–	–	0,69
Краснодарский край [Krasnodar Krai]	283	249	30	4	–	–	0,67
Красноярский край [Krasnoyarsk Krai]	1637	1 519	111	7	–	–	0,41
Приморский край [Primorsky Krai]	232	216	15	1	–	–	0,40
Ставропольский край [Stavropol Krai]	321	231	88	2	–	–	0,76
Хабаровский край [Khabarovsk Krai]	174	134	30	10	–	–	0,84
Амурская область [Amur Oblast]	55	17	13	25	–	–	1,70
Архангельская область [Arkhangelsk Oblast]	353	295	54	4	–	–	0,59
Астраханская область [Astrakhan Oblast]	76	76	–	–	–	–	0,33
Белгородская область [Belgorod Oblast]	106	105	1	–	–	–	0,41
Брянская область [Bryansk Oblast]	6	6	–	–	–	–	0,36
Владимирская область [Vladimir Oblast]	63	58	5	–	–	–	0,54
Волгоградская область [Volgograd Oblast]	546	358	186	2	–	–	0,74

ЕСКИД и радиационно-гигиеническая паспортизация

Продолжение таблицы 3

Наименование субъекта РФ [Subject of the RF]	Численность персонала, чел. [Number of personnel]	Диапазон индивидуальных доз, мЗв [Range of individual doses, mSv]					СИД*, мЗв [Average individual dose, mSv]
		0-1	1-2	2-5	5-12,5	>12,5	
Вологодская область [Vologda Oblast]	26	4	18	4	-	-	1,47
Воронежская область [Voronezh Oblast]	88	80	6	2	-	-	0,42
Ивановская область [Ivanovo Oblast]	129	125	4	-	-	-	0,52
Иркутская область [Irkutsk Oblast]	192	58	115	19	-	-	1,26
Калининградская область [Kaliningrad Oblast]	68	59	8	1	-	-	0,57
Калужская область [Kaluga Oblast]	125	111	10	4	-	-	0,64
Камчатский край [Kamchatka Krai]	856	856	-	-	-	-	0,16
Кемеровская область [Kemerovo Oblast]	43	28	14	1	-	-	0,91
Кировская область [Kirov Oblast]	60	56	4	-	-	-	0,53
Костромская область [Kostroma Oblast]	45	36	4	5	-	-	0,81
Курганская область [Kurgan Oblast]	43	43	-	-	-	-	0,12
Курская область [Kursk Oblast]	82	37	38	7	-	-	1,13
Ленинградская область [Leningrad Oblast]	1 417	1 344	65	7	1	-	0,32
Липецкая область [Lipetsk Oblast]	103	75	25	3	-	-	0,82
Магаданская область [Magadan Oblast]	56	56	-	-	-	-	0,18
Московская область [Moscow Oblast]	1 012	768	238	2	4	-	0,67
Мурманская область [Murmansk Oblast]	189	166	23	-	-	-	0,39
Нижегородская область [Nizhny Novgorod Oblast]	213	206	6	1	-	-	0,50
Новгородская область [Novgorod Oblast]	35	6	28	1	-	-	1,35
Новосибирская область [Novosibirsk Oblast]	344	301	40	3	-	-	0,73
Омская область [Omsk Oblast]	369	166	149	54	-	-	1,35
Оренбургская область [Orenburg Oblast]	68	28	36	4	-	-	1,14
Орловская область [Oryol Oblast]	28	13	15	-	-	-	1,09
Пензенская область [Penza Oblast]	48	15	32	-	1	-	1,15
Пермский край [Perm Krai]	200	106	91	3	-	-	0,90
Псковская область [Pskov Oblast]	84	37	46	1	-	-	1,00

Наименование субъекта РФ [Subject of the RF]	Численность персонала, чел. [Number of personnel]	Диапазон индивидуальных доз, мЗв [Range of individual doses, mSv]					СИД*, мЗв [Average individual dose, mSv]
		0-1	1-2	2-5	5-12,5	>12,5	
Ростовская область [Rostov Oblast]	173	111	61	1	-	-	0,74
Рязанская область [Ryazan Oblast]	66	57	9	-	-	-	0,64
Самарская область [Samara Oblast]	455	411	39	3	2	-	0,80
Саратовская область [Saratov Oblast]	240	195	45	-	-	-	0,59
Сахалинская область [Sakhalin Oblast]	63	49	12	2	-	-	0,53
Свердловская область [Sverdlovsk Oblast]	1098	967	104	23	4	-	0,49
Смоленская область [Smolensk Oblast]	7	5	2	-	-	-	0,71
Тамбовская область [Tambov Oblast]	13	13	-	-	-	-	0,43
Тверская область [Tver Oblast]	30	21	9	-	-	-	0,70
Томская область [Tomsk Oblast]	1029	1 001	20	8	-	-	0,34
Тульская область [Tula Oblast]	37	30	7	-	-	-	0,89
Тюменская область [Tyumen Oblast]	218	156	53	9	-	-	0,75
Ульяновская область [Ulyanovsk Oblast]	177	128	44	5	-	-	0,82
Челябинская область [Chelyabinsk Oblast]	1 672	1 463	190	19	-	-	0,51
Забайкальский край [Zabaykalsky Krai]	35	21	14	-	-	-	0,83
Ярославская область [Yaroslavl Oblast]	24	23	1	-	-	-	0,48
Москва [Moscow]	3 898	2 075	1 773	47	3	-	0,86
Санкт-Петербург [Saint Petersburg]	693	454	222	17	-	-	0,66
Еврейская автономная область [Jewish Autonomous Oblast]	7	7	-	-	-	-	0,21
Республика Крым [Republic of Crimea]	42	35	7	-	-	-	0,61
Ненецкий автономный округ [Nenets Autonomous Okrug]	73	70	3	-	-	-	0,20
Ханты-Мансийский автономный округ – Югра [Khanty-Mansi Autonomous Okrug–Yugra]	351	281	64	6	-	-	0,67
Чукотский автономный округ [Chukotka Autonomous Okrug]	13	12	1	-	-	-	0,15
Ямало-Ненецкий автономный округ [Yamalo-Nenets Autonomous Okrug]	180	122	55	3	-	-	0,68
Севастополь [Sevastopol]	79	73	6	-	-	-	0,44

Окончание таблицы 3

Наименование субъекта РФ [Subject of the RF]	Численность персонала, чел. [Number of personnel]	Диапазон индивидуальных доз, мЗв [Range of individual doses, mSv]					СИД*, мЗв [Average individual dose, mSv]
		0–1	1–2	2–5	5–12,5	>12,5	
Всего по РФ [Total in Russia]	22 490	17 594	4 533	348	15	0	0,61
Вклад, % [Contribution%]		78,2	20,2	1,5	0,1	0	

* – средняя по субъекту Российской Федерации индивидуальная годовая эффективная доза техногенного производственного облучения персонала группы Б [* – The average individual annual effective dose of technogenic industrial exposure of group B personnel for the subject of the Russian Federation].

Таблица 4

Сведения об учреждениях, в которых в 2021 г. персоналом группы Б были получены годовые индивидуальные дозы техногенного производственного облучения, превышающие 5 мЗв

[Table 4

Information about facilities in which, in 2021, the personnel of group B received annual individual doses of man-made occupational exposure exceeding 5 mSv]

Субъект РФ [Region of the Russian Federation]	Количество, чел. [Number of persons]	Название учреждения [Facility]
Московская область [Moscow region]	4	ГБУЗ МО «ДЦГБ» [GBUZ MO "DCGB"]
Свердловская область [Sverdlovsk region]	4	ГАУЗ СО «ЦГКБ № 23» [GAUZ SO "CGKB №23"] ООО ПК «СпецАтом-Сервис» [JSC PK "SpecAtomService"]
Самарская область [Samara region]	2	ГБУЗ СО «ТГКБ №5» [GBUZ SO "TGKB №5"]
Пензенская область [Penza region]	1	ГБУЗ «ПОКБ им Н.Н. Бурденко» [GBUZ "POKB after N.N. Burdenko"]
г. Москва [Moscow]	3	ООО «ГИСТЕРЕЗИС» [JSC "Gysteresys"]
Ленинградская область [Leningrad region]	1	
ВСЕГО [Total]	15	

Как видно из представленных данных, в последние годы количество превышений среднегодового предела дозы для персонала группы Б больше, чем для персонала группы А, хотя индивидуальная дозиметрия проводится лишь для небольшой части данной категории персонала. В основном, случаи превышения регистрируются для членов хирургических бригад, проводящих операции под рентгеновским контролем, которые непосредственно не осуществляют обращение с техногенными ИИИ и относятся к персоналу группы Б. Это говорит о необходимости введения обязательного индивидуального дозиметрического контроля для этой категории персонала группы Б.

В таблице 5 представлены средние и максимальные индивидуальные годовые эффективные дозы техногенного производственного облучения персонала группы А для некоторых наиболее распространенных профессий и должностей.

Как видно, наибольшие максимальные индивидуальные дозы имеют место для дефектоскопистов, врачей, инженеров и слесарей-ремонтников, а наибольшие средние индивидуальные дозы – для дефектоскопистов, сле-

сарей по ремонту реакторно-турбинного оборудования, слесарей-ремонтников, электросварщиков и операторов реакторного отделения.

По данным радиационно-гигиенического паспорта Российской Федерации за 2021 г. [1], в зонах наблюдения радиационных объектов I категории потенциальной радиационной опасности в 2021 г. проживало 1,54 млн человек. Коллективная годовая эффективная доза техногенного облучения данной категории населения за счет функционирования радиационных объектов составила 27,5 чел.-Зв, что соответствует 0,018 мЗв на человека. Данная величина всего в 1,8 раза превышает годовую эффективную дозу 0,01 мЗв, соответствующую пренебрежимо малому радиационному риску, и в 55 раз меньше среднегодового предела дозы для населения, равного 1,0 мЗв.

Заключение

Таким образом, радиационная обстановка на радиационных объектах Российской Федерации достаточно стабильна и соответствует требованиям обеспечения радиационной безопасности. Средние по субъектам

Таблица 5

Средние и максимальные индивидуальные годовые эффективные дозы техногенного производственного облучения персонала группы А для некоторых наиболее распространенных профессий и должностей

[Table 5]

Average and maximum individual annual effective doses of man-made occupational exposure of group A personnel for some of the most common professions and positions]

Профессия/должность [Professions and positions]	Количество, чел. [Amount of personnel]	Средняя годовая доза, мЗв [Average maximum individual annual effective dose, mSv]	Максимальная годовая доза, мЗв [Maximum individual annual effective dose, mSv]
Рентгенолаборант [X-ray laboratory assistant]	49 578	0,91	16,5
Медицинская сестра [Nurse]	3457	1,07	17,2
Врач [Physician]	32 848	0,96	20,7
Инспектор [Supervisor]	24 414	0,96	7,79
Дозиметрист [Dosimetrician]	1 628	1,68	16,2
Дефектоскопист рентгено-, гамма-графирования [Nondestructive testing operator]	9 636	1,71	51,0
Инженер [Engineer]	13 947	0,84	19,9
Слесарь-ремонтник [Maintenance technician]	2 765	1,88	19,5
Слесарь по ремонту реакторно-турбинного оборудования [Reactor-turbine equipment repairman]	3 915	2,67	15,5
Оператор реакторного отделения [Reactor department operator]	986	1,76	15,3
Электрогазосварщик [Electric and gas welder]	996	1,82	19,4

Российской Федерации годовые индивидуальные эффективные дозы техногенного производственного облучения персонала группы А не превышают 6%, а персонала группы Б – 12% от установленных среднегодовых пределов дозы. При этом среднегодовые пределы дозы в 2021 г. были превышены для 2 человек из персонала группы А и 12 человек из персонала группы Б. Для них в течение 4 лет необходимо устанавливать контрольные уровни годовой эффективной дозы, обеспечивающие не превышение установленных пределов дозы. Для 1 представителя персонала группы А был превышен установленный предел дозы. В последние годы количество превышений среднегруппового предела дозы для персонала группы Б превышает аналогичную величину для персонала группы Б, хотя количество персонала группы Б, для которого проводится индивидуальный дозиметрический контроль, в 11 раз меньше численности персонала группы А. В основном, это работники хирургических бригад, проводящие операции под рентгеновским контролем. Необходимо сделать индивидуальный дозиметрический контроль данной категории персонала обязательным.

Представленные результаты показывают, что техногенное облучение населения и персонала за счет нормальной эксплуатации техногенных ИИИ является на сегодняшний

день наименее значимым радиационным фактором, как в отношении индивидуальных доз облучения, так и в отношении коллективной дозы облучения населения Российской Федерации. Лишь менее 24 тыс. человек персонала группы А получили в 2021 г. индивидуальную годовую эффективную дозу техногенного производственного облучения, превышающую 2,0 мЗв, которая сравнима со средней годовой эффективной дозой природного облучения (3,36 мЗв), которую получает все население России. Коллективная годовая эффективная доза населения Российской Федерации за счет эксплуатации радиационных объектов в 2021 г. составила менее 0,1% дозы от всех источников.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Барковский А.Н. обеспечил анализ и обобщение информационных материалов, написал черновик рукописи и представил окончательный вариант статьи в редакцию журнала.

Сивенков А.Г., Цовьянов А.Г. и Журавлева В.Г. обеспечили сбор информации об индивидуальных дозах персонала предприятий, обслуживаемых ФМБА России, ее обобщение, анализ и представление соответствующих материалов в статью.

Кувшинников С.И. и Тутельян О.Е. обеспечили сбор информации об индивидуальных дозах персонала предприятий, поднадзорных Роспотребнадзору, ее обобщение и представление соответствующих материалов в статью.

Ахматдинов Руслан Р. и Библин А.М. обеспечили обработку полученных материалов и подготовку таблиц и рисунков.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Финансирование работы осуществлялось по Государственному контракту № 81.001.22.2 от 15.07.2022 г. с ФМБА России.

Литература

1. Шевкун И.Г., Степанов В.С., Романович И.К. и др. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2021 год (Радиационно-гигиенический паспорт Российской

Федерации). М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2022. 138 с.

2. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Братилова А.А. и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2016 году: информационный сборник. СПб, 2017. 78 с.
3. Барковский А.Н., Ахматдинов Р.Р., Ахматдинов Р.Р. и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2017 году: информационный сборник. СПб, 2018. 69 с.
4. Барковский А.Н., Ахматдинов Р.Р., Ахматдинов Р.Р. и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2018 году: информационный сборник. СПб, 2019. 71 с.
5. Барковский А.Н., Ахматдинов Р.Р., Ахматдинов Р.Р. и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2019 году: информационный сборник. СПб, 2020. 70 с.
6. Барковский А.Н., Ахматдинов Р.Р., Ахматдинов Р.Р. и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2020 году: информационный сборник. СПб, 2021. 80 с.
7. Барковский А.Н., Ахматдинов Р.Р., Ахматдинов Р.Р. и др. Радиационная обстановка на территории Российской Федерации в 2021 году: справочник. СПб, 2022. 76 с.

Поступила: 25.10.2022 г.

Барковский Анатолий Николаевич – главный научный сотрудник, руководитель Федерального радиологического центра Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: ANBarkovski@yandex.ru

Ахматдинов Руслан Расимович – младший научный сотрудник Информационно-аналитического центра Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

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

Сивенков Александр Геннадьевич – инженер Федерального медицинского биофизического центра имени А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

Цовьянов Александр Георгиевич – заведующий лабораторией Федерального медицинского биофизического центра имени А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

Журавлева Валентина Егоровна – инженер Федерального медицинского биофизического центра имени А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

Кувшинников Сергей Иванович – врач по радиационной гигиене лаборатории радиационного контроля и физических факторов Федерального центра гигиены и эпидемиологии Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, Россия

Тутельян Ольга Евгеньевна – кандидат медицинских наук, заведующий лабораторией радиационного контроля и физических факторов отдела лабораторного дела Федерального центра гигиены и эпидемиологии Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, Россия

Для цитирования: Барковский А.Н., Ахматдинов Руслан Р., Библин А.М., Сивенков А.Г., Цовьянов А.Г., Журавлева В.Г., Кувшинников С.И., Тутельян О.Е. Облучение персонала и населения зон наблюдения радиационных объектов в 2021 году // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 106-121. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-106-121

Radiation exposure of personnel and public of radiation control areas of radiation hazardous facilities in the Russian Federation in 2021

Anatoly N. Barkovsky¹, Ruslan R. Akhmatdinov¹, Artem M. Biblin¹, Aleksandr G. Sivenkov², Aleksandr G. Tsovyanov²,
Valentina E. Zhuravleva², Sergey I. Kuvshinnikov³, Olga E. Tutelyan³

¹ Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

² State Research Center – A. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

³ Federal Center of Hygiene and Epidemiology, Federal Service for Surveillance on Consumer rights Protection and Human Well-Being, Moscow, Russia

The article presents analysis of exposure doses to the population of observation zones and personnel of radiation facilities of the Russian Federation in 2021. For the analysis, we used data received by the Federal Data Bank on Personnel Exposure Doses, which operates as part of the Unified System of Individual Dose Control of the Russian Federation citizens. Data received from 20 359 radiation facilities were used. Among them, there are 19 743 radiation hazardous facilities supervised by Rospotrebnadzor and 616 supervised by the FMBA of Russia. 15 883 (78%) radiation hazardous facilities are medical institutions. In total, in 2021, the Federal Data Bank on Personnel Exposure Doses received the results of measuring the annual individual effective doses of technogenic industrial exposure of 239 743 persons of group A personnel and 22 490 persons of group B personnel. 12 095 people of group A personnel who worked part-time at several radiation facilities were identified. The average annual effective dose of technogenic occupational exposure of group A personnel in 2021 was 1.12 mSv, and for group B personnel, whose exposure doses were obtained according to instrumental control data – 0.61 mSv. The maximum values of the average annual effective dose of technogenic occupational exposure for group A personnel in 2021 took place in the Zabaykalsky Krai (2.81 mSv), Perm Krai (2.60 mSv), the Ulyanovsk region (2.03 mSv), the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug (1.93 mSv) and the Republic of Buryatia (1.91 mSv). The average individual annual effective dose of technogenic occupational exposure for part-time workers in 2021 was 1.92 mSv/year. It's in 1.7 times higher compared to personnel A group. In 2021, two cases of exceeding the annual individual dose of 20 mSv and one case of exceeding the annual individual dose of 50 mSv for group A personnel and 12 cases of exceeding the annual individual dose of 5 mSv for group B personnel were identified. The annual individual dose of technogenic occupational exposure of 51.0 mSv (exceeding the dose limit for group A personnel) was registered in the Production association "Sevmash" in the Arkhangelsk region. In 2021, 1.54 million people lived in the radiation control areas of category I of potential hazard radiation facilities. The average annual effective dose of technogenic exposure to this category of the population due to the operation of radiation facilities was 0.018 mSv, which is only 1.8 times higher than the annual effective dose of 0.01 mSv, corresponding to a negligible radiation risk and 55 times less than the average annual dose limit for the population, equal to 1.0 mSv. In general, the radiation situation at the radiation facilities of the Russian Federation is quite stable and complies with safety requirements. Technogenic exposure of the population and personnel due to the normal operation of technogenic sources of ionizing radiation is the least significant radiation factor, both for individual exposure doses and for the collective exposure dose to the population of the Russian Federation. In 2021, only less than 24 thousand persons of group A personnel received annual effective dose of technogenic occupational exposure exceeding 2.0 mSv, which is comparable to the average annual effective dose of natural exposure (3.36 mSv) received by the entire population of Russia. The collective annual effective dose to the population of the Russian Federation due to the operation of radiation facilities in 2021 was less than 0.1% of the dose from all sources.

Key words: annual effective doses, technogenic occupational exposure, personnel, population of radiation control zones, Unified System of Individual Dose Control of the Russian Federation citizens.

Anatoly N. Barkovsky

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

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

Personal contribution of authors

Barkovsky A.N. performed analysis and evaluation of the information materials, prepared draft of the manuscript and submitted the final version to the journal;

Sivenkov A.G., Zovyanov A.G. and Zhuravleva V.G. collected the data on the individual staff doses for FMBA facilities, performed analysis, evaluation and presented the corresponding materials into the manuscript;

Kuvshinnikov S.I. and Tutelyan O.E. collected the data on the individual staff doses for Rospotrebnadzor facilities, performed analysis, evaluation and presented the corresponding materials into the manuscript;

Akhmatdinov Ruslan R. and Biblin A.M. processed the materials and prepared tables and figures.

Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

Sources of finance

The study was financed by a State contract № 81.001.22.2, 15.07.2022 with FMBA of Russia.

References

1. Shevkun IG, Stepanov VS, Romanovich IK, et al. The results of radiation-hygienic passportization in the subjects of the Russian Federation for 2021. Radiation-hygienic passport of the Russian Federation. Moscow: Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Well-being; 2022. 138 p. (In Russian).
2. Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bratilova AA, et al. Information Bulletin: Radiation doses in Russia, 2016. Saint-Petersburg; 2017. 78 p. (In Russian).
3. Barkovsky AN, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, et al. Information Bulletin: Radiation doses in Russia, 2017. Saint-Petersburg; 2018. 69 p. (In Russian).
4. Barkovsky AN, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, et al. Information Bulletin: Radiation doses in Russia, 2018. Saint-Petersburg; 2019. 71 p. (In Russian).
5. Barkovsky AN, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, et al. Information Bulletin: Radiation doses in Russia, 2019. Saint-Petersburg; 2020. 70 p. (In Russian).
6. Barkovsky AN, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, et al. Information Bulletin: Radiation doses in Russia, 2020. Saint-Petersburg; 2021. 80 p. (In Russian).
7. Barkovsky AN, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, et al. Guide: Radiation situation on the territory of the Russian Federation in 2021. Saint-Petersburg; 2022. 76 p. (In Russian).

Received: October 25, 2022

For correspondence: Anatoly N. Barkovsky – The head of Federal Radiological Centre, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: ANBarkovski@yandex.ru)

Ruslan R. Akhmatdinov – Junior research fellow, Information-analytical center of the Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P. V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

Artem M. Biblin – Information Analytical Center Head, 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

Aleksandr G. Sivenkov – Engineer, State Research Center – A. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

Aleksandr G. Tsovyanov – Laboratory Head, State Research Center – A. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

Valentina E. Zhuravleva – Engineer, State Research Center – A. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

Sergey I. Kuvshinnikov – Radiation Control and Physical Factors Laboratory physicist expert, Laboratory Studies Department of Federal Hygiene and Epidemiology Center of Federal Service for Surveillance on Consumer rights Protection and Human Well-Being, Moscow, Russia

Olga E. Tutelyan – Candidate of Medical Sciences, Radiation Control and Physical Factors Laboratory Head, Federal Hygiene and Epidemiology Center Laboratory Studies, Moscow, Russia

For citation: Barkovsky A.N., Akhmatdinov Ruslan R., Biblin A.M., Sivenkov A.G., Tsovyanov A.G., Zhuravleva V.E., Kuvshinnikov S.I., Tutelyan O.E. Radiation exposure of personnel and public of radiation control areas of radiation hazardous facilities in the Russian Federation in 2021. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 4, P. 106-121. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-106-121

Тенденции развития ядерной медицины в Российской Федерации за 2015–2020 гг.

Л.А. Чипига^{1,2,3}, Е.Р. Ладанова¹, А.В. Водоватов^{1,4}, И.А. Звонова¹, А.А. Мосунов⁵,
Л.Т. Наурзбаева⁵, С.А. Рыжов^{6,7,8}

¹Санкт-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

²Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

³Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

⁴Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

⁵Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

⁶Ассоциация медицинских физиков России, Москва, Россия

⁷Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий, Департамент здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

⁸Национальный медицинский исследовательский центр детской гематологии, онкологии и иммунологии имени Дмитрия Рогачева, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Москва, Россия

В статье представлен анализ структуры ядерной медицины по данным федеральных форм статистической отчетности (3-ДОЗ, формы № 30 Минздрава России и радиационно-гигиенические паспорта) субъектов Российской Федерации за период 2015–2020 гг. с целью оценки текущего состояния ядерной медицины, оценки динамики развития ядерной медицины и разработки предложений по совершенствованию отечественной системы радиационной безопасности в ядерной медицине и предложений по совершенствованию формы 3-ДОЗ. За последние 6 лет число диагностических радионуклидных исследований в стране находилось на уровне около 530–550 тысяч в год. В 2020 г. наблюдалось незначительное снижение числа данных исследований, обусловленное эпидемией коронавирусной инфекции. Наибольшее число исследований в среднем за период 2015–2020 гг. было выполнено в Москве (21%) и Санкт-Петербурге (11%). В этих городах расположены специализированные федеральные центры, оснащенные высокотехнологичным оборудованием, в которых проводят диагностику местным жителям и пациентам из разных регионов страны. Наиболее распространенным в России является исследование скелета, составляющее около 40% от всех радионуклидных диагностических исследований; наблюдается умеренный рост данного вида исследований. Отмечается высокое число исследований почек (17%), с тенденцией их снижения с каждым годом. Следующими по частоте проведения являются исследования сердца, щитовидной железы, печени и легких, число которых за период наблюдения снижается. На фоне снижения числа «функциональных» исследований число «прочих» исследований, к которым относятся томографические исследования, с 2015 г. возросло в 3,7 раза, что обусловлено развитием современных диагностических технологий, модернизацией аппаратного парка: снижением числа ренографов и сканеров и ростом числа аппаратов для однофотонной эмиссионной компьютерной томографии, вводом в строй новых отделений позитронно-эмиссионной диагностики. На одном аппарате для однофотонных радионуклидных исследований (ренограф, гамма-камера, однофотонный эмиссионный томограф) в среднем выполнялось около 2000 исследований за год, при этом на гибридных однофотонных эмиссионных томографах, совмещенных с компьютерным томографом, проводилось по 0,6 тысяч исследований в год. С 2015 г. годовая коллективная доза от радионуклидной диагностики в стране выросла с 1,2 до 3,7 тыс. чел.-Зв. Данные формы №-ДОЗ показывают, что наибольший вклад в коллективную дозу в России вносят «прочие» исследования, к которым относятся ОФЭКТ/КТ и ПЭТ/КТ-исследования всего тела – 55% (39% в Санкт-Петербурге, 60% в Москве). Однако несовершенство действующих

Чипига Лариса Александровна

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

федеральных форм статистической отчетности затрудняет оценку текущего уровня развития ядерной медицины в Российской Федерации. В рамках актуализации действующей формы №3-ДОЗ авторами данной работы был кардинально переработан раздел по радионуклидной диагностике; обновленный вариант формы №3-ДОЗ находится на утверждении. Тем не менее, для детальной и достоверной оценки структуры ядерной медицины в стране необходимо проведение выборочных сборов данных о видах проводимых процедур, используемых радиофармпрепаратах и методиках, половозрастном составе и уровнях облучения различных групп пациентов. Данное исследование целесообразно проводить в Санкт-Петербурге или Москве как субъектах Российской Федерации, аккумулирующих больше половины всех радионуклидных исследований.

Ключевые слова: формы статистической отчетности, форма 3-ДОЗ, форма № 30, ядерная медицина, радионуклидная диагностика, радионуклидная терапия, сцинтиграфия, однофотонная эмиссионная компьютерная томография, позитронная эмиссионная томография, дозы пациентов, коллективная доза.

Введение

Ядерная медицина, включающая радионуклидную диагностику (РНД) и терапию, является одной из наиболее активно развивающихся областей лучевой диагностики в мире [1–3]. Развитие ядерной медицины подразумевает внедрение новых радиофармацевтических лекарственных препаратов (РФЛП), внедрение новых технологий, изменение структуры исследований, что опосредованно может приводить к увеличению коллективной дозы населения и радиационных рисков от данного вида диагностики [4–6, 15, 20, 21]. В Российской Федерации развитие РНД (реорганизация отделений радионуклидной диагностики и обновление аппаратного парка) происходит в рамках реализации программы «Развитие ядерной медицины в Российской Федерации»¹, а также за счет увеличения тарифов обязательного медицинского страхования и включения в систему обязательного медицинского страхования наиболее современных методов диагностики, что стимулирует развитие как государственных, так и частных медицинских организаций.

Исследования РНД можно разделить на следующие группы, соответственно методам их выполнения:

- радиометрические («функциональные») исследования, целью которых является обнаружение временных отклонений в обменных процессах органов (например, накопительная функция щитовидной железы, ренография);
- планарные (2D) сцинтиграфические исследования – метод визуализации органа или системы, при котором получают двумерное изображение распределения РФЛП, обычно в передней или задней проекциях, с помощью стационарной гамма-камеры (например, остеосцинтиграфия, сцинтиграфия легких);
- однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ) относится к разновидностям методов

РНД, которые позволяют получить 3D-изображения распределения РФЛП в организме пациента;

- позитронная эмиссионная томография (ПЭТ) основана на применении радионуклидов, распад которых сопровождается испусканием позитрона, и образованием аннигиляционных фотонов. Конструкция позитронно-эмиссионного томографа позволяет методом совпадений регистрировать это излучение и формировать 3D-изображение. В настоящее время данная технология полностью вытеснена гибридными исследованиями;

- гибридные исследования, выполняемые на ОФЭКТ- и ПЭТ-аппаратах, совмещенных с рентгеновскими компьютерными томографами (КТ). Такие исследования сочетают преимущества функциональной и анатомической визуализации и имеют большую диагностическую ценность. Помимо этого, информация о точном расположении органов и плотностей в организме, получаемая при КТ, используется для коррекции ослабления излучения при реконструкции ПЭТ- и ОФЭКТ-изображений.

К сожалению, оценить текущий уровень развития РНД в стране затруднительно, так как информация о структуре, аппаратном парке и уровнях облучения пациентов в целом по стране доступна только из федеральных форм статистической отчетности:

- сведения о медицинском облучении пациентов собираются с использованием формы 3-ДОЗ² в рамках «Единой системы контроля индивидуальных доз населения» (ЕСКИД);
- в рамках ЕСКИД также ежегодно оформляются радиационно-гигиенические паспорта (РГП) предприятий и территорий, которые используют источники ионизирующих излучений³ и которые содержат данные о числе проведенных рентгенорадиологических исследований и средних дозах за исследование у пациентов.

¹ Распоряжение Правительства Российской Федерации «Об утверждении мероприятий («дорожной карты») «Развитие центров ядерной медицины» от 23.10.2015 № 2144-р [Order of the Government of the Russian Federation on approval of arrangement (“road map”) “Development of Nuclear Medicine Centers” 23.10.2015 No. 2144-r (In Russ.)]

² Форма статистического наблюдения 3-ДОЗ «Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских диагностических рентгенорадиологических исследований в РФ», утвержденная Приказом Росстата от 16.10.2013 г. № 411 [Statistical form 3-DOZ “Data on patient doses from X-ray examinations in the Russian Federation”, approved by Order of Rosstat 16.10.2013 No. 411. (In Russ.)]

³ МР 2.6.1.0257-21 «Проведение радиационно-гигиенической паспортизации. Методические рекомендации», утвержденные Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 01.09.2021 г. [MR 2.6.1.0257-21 “Radiation-hygienic certification. Guidelines”, approved by the Rospotrebnadzor on 01.09.2021. (In Russ.)]

– Минздрав России ведет статистический учет медицинской деятельности по форме № 30 «Сведения о медицинской организации»⁴, где в том числе отдельный раздел посвящен РНД.

Все эти формы были разработаны более 20 лет назад, их структура сбора данных не отвечает текущей структуре и технологиям ядерной медицины, однако только эти формы статистического наблюдения концентрируют информацию о медицинском облучении со всей страны [7]. Указанное обстоятельство определяет ограничения (степень детализации) проведенного исследования

Цель исследования – выполнение анализа доступной информации по форме № 30 и форме 3-ДОЗ для оценки текущего состояния и динамики развития новых технологий и методов в ядерной медицине в стране за период с 2015 по 2020 г. для разработки предложений по совершенствованию отечественной системы радиационной безопасности в РНД и совершенствования статистической системы сбора данных 3-ДОЗ.

Материалы и методы

В работе был проведен анализ основных источников информации о структуре лучевой диагностики и коллективных доз населения в Российской Федерации – формы государственной статистической отчетности № 3-ДОЗ, формы № 30 Минздрава России и РГП субъектов Российской Федерации за 2015–2020 гг. [7–12].

В работе проанализированы данные из таблицы 3000 формы № 3-ДОЗ и таблиц 5120, 5121 и 5122 формы № 30.

Статистическая обработка данных была выполнена с использованием программного обеспечения Excel.

Результаты и обсуждение

Анализ данных формы 3-ДОЗ показывает, что за последние 6 лет число исследований в среднем находится на уровне 530–550 тысяч в год. Динамика числа исследований в Российской Федерации представлена на рисунке 1. Снижение числа РНД-исследований в 2020 г. обусловлено эпидемией коронавирусной инфекции, переводом части медицинских организаций на обслуживание пациентов с вирусной пневмонией и остановкой штатной работы отделений РНД [13]. Результаты оценки числа РНД-исследований из разных источников сопоставимы на уровне Российской Федерации. В 2015–2019 гг. расхождения по количеству исследований между данными источниками не превышали 15%, в 2020 г. расхождения достигли 26%. Данные расхождения обусловлены различным уровнем охвата медицинских организаций данными формами, различиями в структуре собираемых данных и ошибками при заполнении форм и передаче информации. Форма № 3-ДОЗ учитывает все медицинские организации, эксплуатирующие медицинские источники ионизирующего излучения, подчиненные Минздраву России. Форму № 30 заполняют только государственные медицинские организации. В РГП поступает информация от всех организаций, эксплуатирующих источники ионизирующего излучения, подчиненных разным ве-

домствам (Федеральное медико-биологическое агентство, Минобороны России, Министерство внутренних дел и пр.), однако не всегда поступали сведения от всех ведомств.

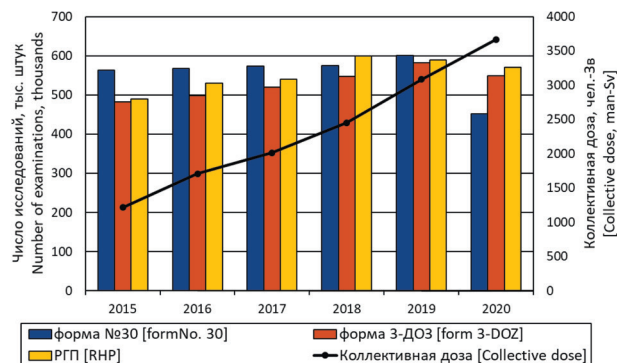


Рис. 1. Динамика числа РНД-исследований и коллективной дозы за 2015–2020 гг. на основании формы 3-ДОЗ, формы № 30 и РГП

[Fig. 1. Dynamics of the number of radionuclide diagnostic examinations and collective dose for 2015–2020 according to the form 3-DOZ, form No. 30 and the Radiation Hygiene Passport (RHP)]

Наибольший вклад в общее число исследований внесли следующие субъекты: г. Москва, г. Санкт-Петербург, Республика Татарстан, Республика Башкортостан, Челябинская область, Иркутская область и Ростовская область (рис. 2). Динамика изменения числа РНД-исследований для данных субъектов России за период 2015–2020 гг. представлена в таблице 1.

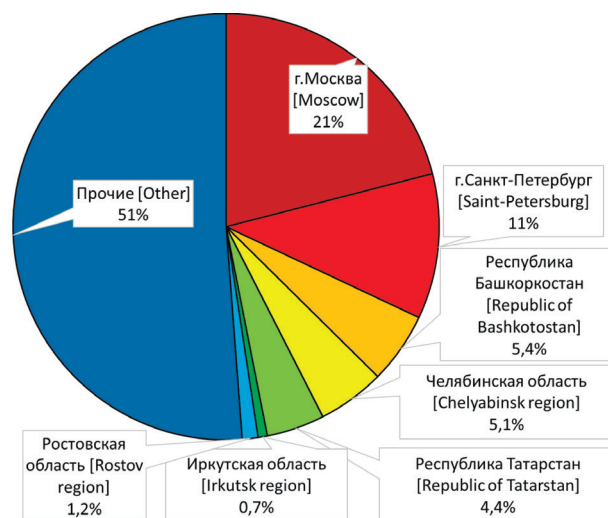


Рис. 2. Вклад субъектов Российской Федерации в общее число исследований в период с 2015 по 2020 г. по форме 3-ДОЗ
[Fig. 2. The contribution of the regions of the Russian Federation to the total number of radionuclide diagnostic examinations according to the form 3-DOZ from 2015 to 2020]

⁴ Форма № 30 «Сведения о лечебно-профилактическом учреждении», утвержденная Постановлением Госкомстата России от 10.09.2002 г. № 175. [Form No. 30 «Data on the medical facilities», approved by the Order of Goskomstat, 10.09.2002 No. 175. (In Russ.)]

Таблица 1

Число исследований за 2015–2020 гг. по форме 3-ДОЗ, форме № 30 (Ф-30) в субъектах с наибольшим числом РНД-исследований

[Table 1

The amount of radionuclide diagnostic examinations for 2015-2020 according to the form 3-DOZ, form No. 30 (F-30) in regions with the largest number of examinations]

Регион [Region]	Число исследований, тысяч шт. [Number of examinations, thousands]											
	2015		2016		2017		2018		2019		2020	
	3-ДОЗ [3-DOZ]	Ф-30 [F-30]	3-ДОЗ [3-DOZ]	Ф-30 [F-30]	3-ДОЗ [3-DOZ]	Ф-30 [F-30]	3-ДОЗ [3-DOZ]	Ф-30 [F-30]	3-ДОЗ [3-DOZ]	Ф-30 [F-30]	3-ДОЗ [3-DOZ]	Ф-30 [F-30]
РФ [RF]	483	563	501	567	524	573	547	575	582	602	549	452
г. Москва [Moscow]	87	118	96,9	118	112	118	124	119	122	91,2	120	66,8
г. Санкт-Петербург [St. Petersburg]	42,7	41,6	53,2	56	60,6	59,2	65,2	63,8	72,5	54,2	60,2	42,3
Республика Татарстан [Republic of Tatarstan]	26,5	29,8	26	30,6	26,9	32	22,2	30,6	20,6	23,2	15,9	15,9
Челябинская область [Chelyabinsk region]	34,3	28	24,5	26,4	34,3	27,3	23,9	26,1	24,1	18,4	20,6	13,5
Республика Башкортостан [Republic of Bashkortostan]	26,2	27,9	27,8	26,7	25,6	29,5	30,6	26,8	31,8	22	28,4	18,5
Ростовская область [Rostov region]	3,71	3,71	4,47	4,55	5,29	5,35	4,71	5,87	10,6	33,6	11,3	25,6
Иркутская область [Irkutsk region]	3,87	17,7	3,66	17,1	3,39	18	3,71	18,5	3,3	28,6	2,62	23,1

Максимальное число РНД-исследований было выполнено в Москве и Санкт-Петербурге (21% и 11% от общего числа исследований соответственно). Такой большой вклад обусловлен тем, что в данных субъектах расположены федеральные центры, оснащенные высокотехнологичным оборудованием, в которых проводят исследования пациентам из разных регионов, и большой численностью населения этих городов. Следует отметить, что за исследованный период РНД-исследования не проводились в 20 субъектах Российской Федерации: Костромская область, Тверская область, Республика Коми, Ненецкий автономный округ, Ленинградская область, Республика Адыгея, Республика Калмыкия, Республика Дагестан, Кабардино-Балкарская Республика, Карачаево-Черкесская Республика, Северная Осетия – Алания, Чеченская Республика, Республика Марий Эл, Ямало-Ненецкий автономный округ, Республика Алтай, Республика Хакасия, Еврейская автономная область, Чукотский автономный округ, Республика Ингушетия, Республика Тыва. В форме № 30 дополнительно отсутствовали данные о РНД в Приморском крае и Магаданской области.

Наибольшее число проводимых РНД-исследований оказалось в Санкт-Петербурге и Москве – 11 и 10 исследований на 1000 жителей в 2020 г. соответственно, несмотря на медицинский туризм и приток пациентов из других регионов. В целом по стране среднее число РНД исследований в 2020 г. составило всего 4 исследования на 1000 жителей.

В формах 3-ДОЗ детализация структуры РНД осуществляется на уровне исследований органов (легкие, сердце, скелет, желудочно-кишечный тракт, почки, печень, щитовидная железа, головной мозг и «прочие» – другие исследования) и по трем объединенным группам методов исследований (функциональные, сцинтиграфия,

прочие). В форме № 30 Минздрава России собираются сведения по более детальному перечню диагностических процедур и выделяются исследования на разных типах аппаратуры, в том числе на ОФЭКТ, ОФЭКТ/КТ, ПЭТ/КТ, которые в форме 3-ДОЗ учитываются в графе «Прочие». Вклады этих категорий в общее число исследований в среднем за обследованный период для форм № 3-ДОЗ и № 30 представлены на рисунке 3.

Наиболее распространенным в России является исследование скелета: 40% от всех РНД-исследований по форме 3-ДОЗ и 45% по форме № 30, при этом наблюдается умеренный рост данных исследований. Отмечается высокое число исследований почек (17% по форме 3-ДОЗ и 15% по форме № 30), однако их число снижается с каждым годом. Следующими по частоте проведения являются исследования сердца, щитовидной железы, печени и легких. Также отмечаются тенденции к снижению числа некоторых видов РНД-исследований, в частности, исследований печени и оценки тромбоемболии легочной артерии. Это объясняется как использованием КТ в качестве предпочтительного вида диагностики для этих патологических состояний, так и ограниченной доступностью РНД. Структура и тенденции ее изменения в Санкт-Петербурге и Москве схожи с общей по стране. Описанные здесь тренды изменения структуры РНД отмечались и ранее на примере Санкт-Петербурга [14].

В форме 3-ДОЗ выделены 3 группы радионуклидных исследований: функциональные, сцинтиграфические и прочие. Сведения о трендах и изменении числа исследований по отдельным группам в Российской Федерации, Москве и Санкт-Петербурге представлены на рисунке 4. За обследованный период больше всего исследований (около 70%), приходилось на сцинтиграфические, их число практически не менялось с годами. К прочим исследова-

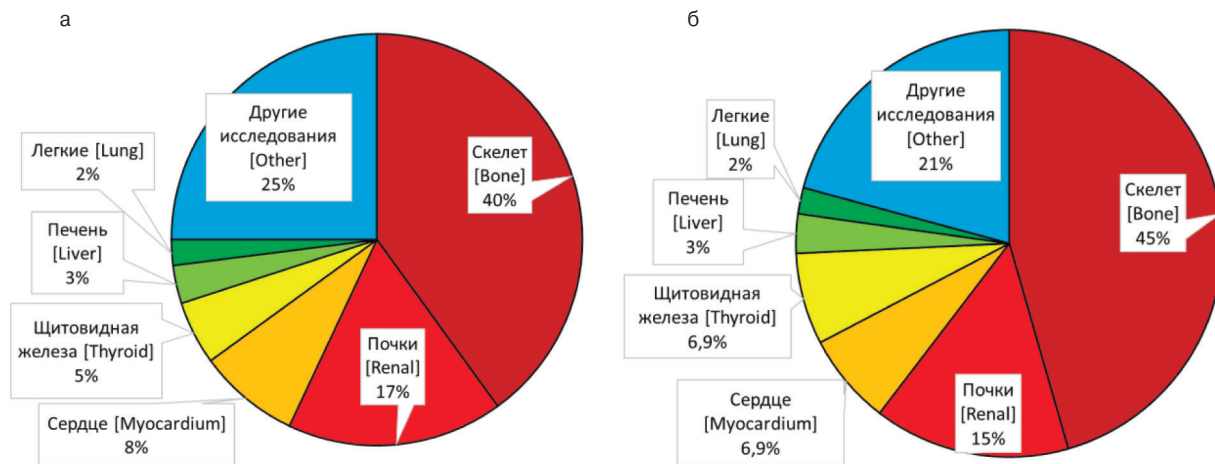


Рис. 3. Вклад от исследований определенных органов или систем органов в общее число исследований в период с 2015 по 2020 г.: а – по форме 3-ДОЗ; б – по форме № 30
[Fig. 3.] Contribution of examinations of specific organs or organ systems to the total number of radionuclide diagnostic examinations from 2015 and 2020 according to: а – the form 3-DOZ; б – the form No. 30

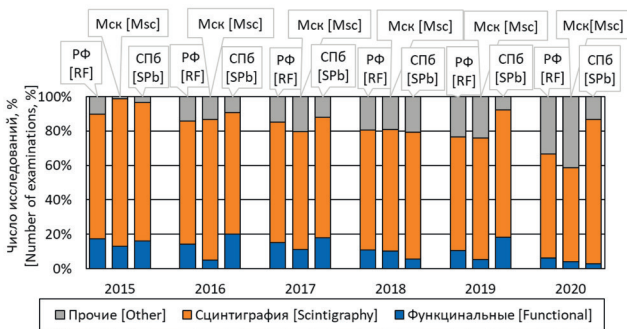


Рис. 4. Динамика числа исследований по отдельным методам исследований в соответствии с структурой формы 3-ДОЗ в Российской Федерации (РФ), г. Москве (Мск), г. Санкт-Петербурге (СПб)
[Fig. 4.] Dynamics of the number of radionuclide diagnostic examinations by individual groups in accordance with the structure of the 3-DOZ form in the Russian Federation (RF), Moscow (Msk), St. Petersburg (SPb)]

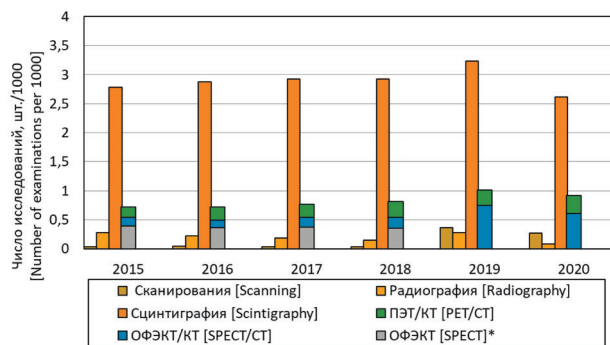


Рис. 5. Динамика числа исследований на 1000 жителей в стране по отдельным группам в соответствии с структурой формы № 30; в 2019 и 2020 гг. ОФЭКТ- и ОФЭКТ/КТ-исследования в форме № 30 были объединены
[Fig. 5.] Dynamics of the number of radionuclide diagnostic examinations per thousand residents in the country by individual groups according to the structure of form No. 30; SPECT and SPECT/CT examinations were combined in 2019 and 2020]

ниям в форме 3-ДОЗ относят томографические радионуклидные исследования (ОФЭКТ, ПЭТ), а также гибридные исследования. На фоне снижения числа функциональных исследований число прочих исследований в стране с 2015 г. возросло в 3,7 раза, что связано с развитием современных диагностических технологий, вводом в строй новых отделений ПЭТ-диагностики, которые оборудованы ПЭТ/КТ-аппаратами и реорганизацией отделений традиционной однофотонной диагностики под новую диагностическую технику, многие из которых получили новые ОФЭКТ- и гибридные ОФЭКТ/КТ-аппараты [15]. Эти данные из формы 3-ДОЗ хорошо соотносятся с данными формы № 30 (рис. 5). Данные тенденции подтверждаются анализом изменения структуры аппаратного парка в стране: снижением числа ренографов и ростом числа аппаратов для томографических исследований (рис. 6).

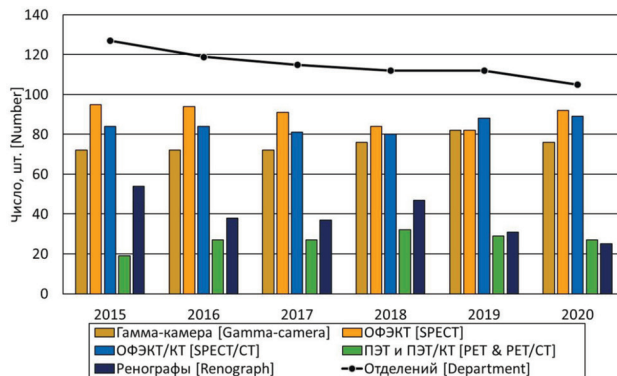


Рис. 6. Динамика аппаратного парка за 2015–2020 гг. в стране по форме № 30
[Fig. 6.] Dynamics of the equipment for 2015–2020 in the country according to the form No. 30]

Анализ аппаратного парка на 2020 г. по данным формы № 30 показал, что 74% эксплуатируемых гамма-камер в Российской Федерации введены в эксплуатацию более 10 лет назад. Существенно более молодым является парк томографов: 65% ОФЭКТ моложе 10 лет, 81% ОФЭКТ/КТ моложе 10 лет, 75% ПЭТ/КТ моложе 10 лет. На 1 млн человек приходится 0,5 гамма-камер и 1,3 томографа для РНД (включая ОФЭКТ, ОФЭКТ/КТ, ПЭТ/КТ), в странах Евросоюза этот показатель варьирует от 2 (Эстония, Румыния) до 16 (Дания) гамма-камер и от 0 до 22 (Бельгия) томографов, в среднем – 10 (Швейцария, Финляндия) [16]. Согласно форме 30, за период 2015–2020 гг. в Российской Федерации число всех аппаратов для РНД остается практически на одном уровне на фоне резкого снижения числа отделений данного вида диагностики.

В среднем одно отделение РНД выполняло 4,8 тысяч исследований за год. На 1 аппарат для однофотонных радионуклидных исследований (рентгенограф, гамма-камера, ОФЭКТ, ОФЭКТ/КТ) приходилось около 2000 исследований за год, при этом на гибридных ОФЭКТ/КТ-сканерах проводилось по 0,6 тысяч совмещенных ОФЭКТ/КТ-исследований в год. На аппаратах ПЭТ-диагностики проводилось в среднем по 1,3 тысячи исследований за год.

В соответствии с Программой развития ядерной медицины в России современные гамма-камеры с цифровыми детектирующими системами, ОФЭКТ и ОФЭКТ/КТ стали более доступны и используются повсеместно, активно развивается ПЭТ-диагностика [14, 15]. Новые методы и технологии проведения исследований, которые требуют больше времени на обследование 1 пациента, сокращают число пациентов, проходящих исследование на 1 аппарате. Внедрение ОФЭКТ, ОФЭКТ/КТ вместо планарных гамма-камер увеличили информативность методов РНД, однако дополнительные возможности новых доступных технологий приводят к увеличению времени на обследование пациента [17]. Планарное сцинтиграфическое исследование одной зоны, которое занимает до 5 мин, в режиме ОФЭКТ занимает 10–20 мин, также дополнительное сканирование одной зоны в томографическом режиме при сканировании скелета увеличивает время исследования на 10–20 мин [18]. Это значительно сокращает пропускную способность аппарата. Обработка и описание множества аксиальных срезов при томографическом исследовании требует больше времени по сравнению с описанием одного планарного изображения. Дополнительная нагрузка на врачей приходится при описании КТ-серий при проведении совмещенных с КТ исследований. Аналогичная ситуация в ПЭТ/КТ-отделениях, где 1 стандартное исследование всего тела занимает от 10 до 40 мин аппаратного времени и 30–60 мин работы врача при обработке и описании исследования [2]. Таким образом, переход на высокотехнологичное гибридное оборудование и применение новых методов исследований приводит к снижению пропускной способности оборудования и числа исследований, которые проводятся отделениями. Одним из вариантов решения указанной проблемы может стать увеличение количества отделений РНД и обеспечение их современным оборудованием. Если решать вопрос в существующих рамках, то необходимо увеличивать время работы отделения за счет перехода на двусменный или круглосуточный режим работы,

однако данное предложение имеет ряд минусов организационного и технического плана.

Средняя доза за РНД-исследование выросла с 2,5 мЗв (2015 г.) до 6,7 мЗв (2020 г.) по данным 3-ДОЗ (рис. 7). Рост средней дозы обусловлен ростом дозы от прочих исследований, к которым относятся томографические и гибридные исследования.

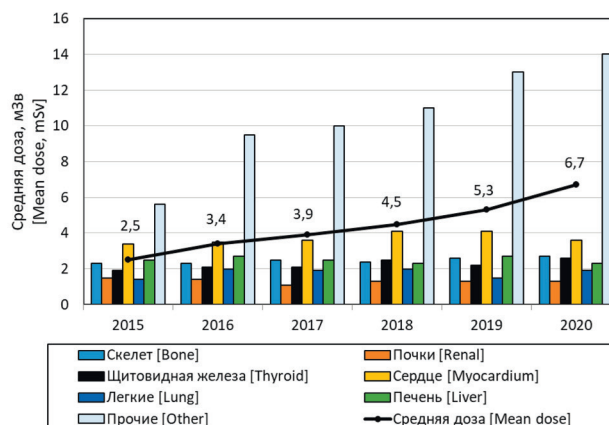


Рис. 7. Динамика средней дозы от разных видов РНД-исследований за 2015–2020 гг. по форме 3-ДОЗ [Fig. 7. Dynamics of the mean dose of different types of radionuclide diagnostic examinations from 2015 to 2020 according to the form 3-DOZ]

С 2015 г. годовая коллективная доза от РНД в стране выросла с 1,2 до 3,7 тыс. чел.-Зв. Наибольший вклад в коллективную дозу в России вносят прочие исследования, к которым относятся в том числе ОФЭКТ/КТ- и ПЭТ/КТ-исследования всего тела – 56% (39% в Санкт-Петербурге, 60% в Москве). За период 2015–2020 гг. коллективная доза от прочих исследований с каждым годом возрастала в 1,5 раза, что привело к росту коллективной дозы от всей РНД в стране, причём в 2020 г. 75% коллективной дозы от РНД обеспечивали прочие исследования (рис. 8). В 2020 г. средняя доза одного исследования РНД составила 6,7 мЗв, средняя доза от прочих исследований – 14 мЗв.

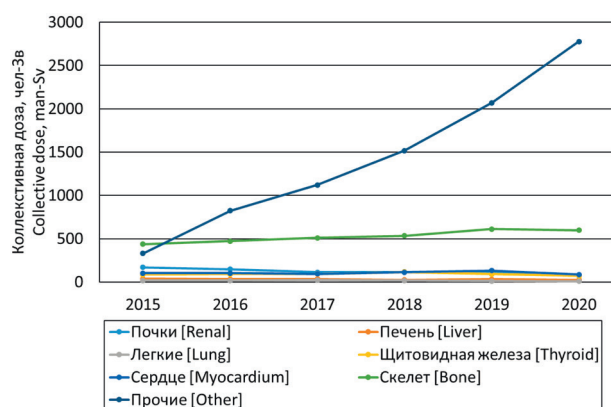


Рис. 8. Динамика коллективной дозы от разных видов РНД-исследований за 2015–2020 гг. по форме 3-ДОЗ [Fig. 8. Dynamics of the collective dose of different types of radionuclide diagnostic examinations from 2015 to 2020 according to the form 3-DOZ]

Дозы пациентов от разных видов исследований из формы 3-ДОЗ соответствуют дозам, полученным в ранее проведенных выборочных исследованиях отделений РНД с детальной оценкой доз пациентов [19–21]. Стоит отметить, что на текущий момент в формах статистической отчетности отсутствует достоверная информация о типичных/индивидуальных дозах облучения пациентов различных возрастных категорий. Доза пациента при РНД определяется введенным радиофармпрепаратом (РФП) и активностью радионуклида в РФП. Эффективную и органические дозы пациентов определяют с использованием коэффициентов перехода от введенной пациенту активности радионуклида в РФП с использованием дозовых коэффициентов⁵. Дополнительному внешнему облучению от КТ-сканирования подвергаются пациенты, проходящие совмещенные ОФЭКТ/КТ- и ПЭТ/КТ-исследования. Дозу внешнего облучения при КТ-сканировании определяют с использованием специализированных программ [22, 23] или утвержденных коэффициентов перехода⁶. Однако в форме 3-ДОЗ учет исследований производится не по РФП, а по анатомической области исследования; отсутствует выделение самых высокодозовых исследований (ПЭТ/КТ, ОФЭКТ/КТ), вклад рентгеновского облучения в гибридных исследованиях учитывается не везде.

В формах статистической отчетности представлена ограниченная информация о процедурах радионуклидной терапии. В форме 3-ДОЗ и РГП данные о терапевтических процедурах отсутствуют, в форме № 30 представлена только численность проводимых исследований. Так, в 2020 г. по данным формы № 30 в России было выполнено 10 235 процедур радионуклидной терапии, при этом 72% процедур проводились с йодом-131, 25% – с введением пациентам остеотропных препаратов.

К сожалению, оценить текущий уровень развития ядерной медицины в Российской Федерации на основании форм статистической отчетности затруднительно в связи с отсутствием достоверной информации о структуре проводимых процедур, аппаратном парке и уровнях облучения пациентов. Это обусловлено, главным образом, несовершенством и неоднородным содержанием действующих федеральных форм статистической отчетности. Так, структура основных источников информации, формы 3-ДОЗ ЕСКИД и формы № 30 Минздрава России кардинально отличается. В форме 3-ДОЗ системы ЕСКИД существует достаточно условная градация на группы функциональных и скинтиграфических исследований, однако нет отдельно выделенных групп для ПЭТ- и ОФЭКТ-исследований, а также совмещенных с КТ исследований. Напротив, в форме № 30 все исследования представлены детально по видам и анатомической области исследования. В форме 3-ДОЗ невозможно выделить гибридные

исследования, совмещенные с КТ, что приводит к грубым ошибкам при оценке структуры коллективной дозы. В обеих формах отсутствует информация по пациентам детского возраста, проходящим РНД-исследования. В форме 3-ДОЗ исследования объединены по анатомическим областям, при этом не учитываются использование различных РФЛП, которые формируют различные дозы у пациента при обследовании одного и того же органа (системы).

С целью повышения достоверности данных, представляемых в форме № 3-ДОЗ, расширения и актуализации номенклатуры проводимых диагностических и терапевтических процедур в ядерной медицине и радиофармпрепаратов в 2015–2020 гг. авторы статьи в рамках актуализации формы № 3-ДОЗ разработали обновленный раздел по радионуклидной диагностике. В качестве основных изменений можно выделить:

- отдельный сбор информации для детей и взрослых пациентов;
- изменение номенклатуры радионуклидных исследований с переходом на комбинацию анатомической области исследования и радионуклида;
- разделение всех радионуклидных диагностических исследований на 3 категории: скинтиграфии/ОФЭКТ; ОФЭКТ/КТ; ПЭТ/КТ.

На текущий момент актуализированная форма № 3-ДОЗ находится на утверждении в Росстате. Тем не менее, даже в актуализированной форме остается ряд ключевых недостатков, которые невозможно устранить: в частности, невозможность оценить дозы облучения пациентов на уровне отдельного аппарата. Это обуславливает сохранение актуальности проведения исследований, направленных на выборочный и детальный сбор и анализ данных по структуре исследований и уровням облучения пациентов в РНД.

Заключение

Несмотря на внедрение новых методов медицинской визуализации и новых РФП, в Российской Федерации с 2015 г. в целом ситуация с РНД кардинально не изменилась. Число исследований находится на стабильном уровне около 550 тыс. исследований в год при сокращении числа исследований из группы функциональных и ростом прочих (томографических) исследований. Анализ годового изменения структуры РНД в России показывает, что в настоящее время наиболее востребованы исследования костной системы с целью диагностики костных метастазов, уменьшилось число исследований почек, печени и легких. Такая динамика объясняется выбором других приоритетных методов диагностики и изменениями в аппаратном оснащении отделений РНД:

⁵ МУ 2.6.1.3700-21 «Оценка и учет эффективных доз у пациентов при проведении радионуклидных диагностических исследований», утвержденные Роспотребнадзором 31.08.2021 г. [МУ 2.6.1.3700-21 «Estimation and accounting of effective doses of patients from radionuclide diagnostic studies», approved by Rospotrebnadzor on 31.08.2021. (In Russ.)]

⁶ МУ 2.6.1.2944-11 «Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований», утвержденные Роспотребнадзором 19.07.2011 г. с изменениями, внесенными МУ 2.6.1.3584-19 «Изменения в МУ 2.6.1.2944-11 «Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований», утвержденными Роспотребнадзором 30.10.2019 г. [МУ 2.6.1.2944-11 «Control of effective doses of patients from X-ray examinations», approved by Rospotrebnadzor on 19.07.2011 as amended by MU 2.6.1.3584-19 “Updates to MU 2.6.1.2944-11 “Control of effective doses of patients from X-ray examinations”, approved by Rospotrebnadzor on 10.30.2019 (In Russ.)].

произошла замена устаревших радиометров и сканеров на современные томографы ОФЭКТ, ОФЭКТ/КТ, ПЭТ/КТ.

Распределение РНД по регионам Российской Федерации неоднородно: более трети всех исследований выполняются в Санкт-Петербурге и Москве. В 20 субъектах Российской Федерации РНД отсутствует. Это позволяет в дальнейшем использовать Санкт-Петербург и Москву в качестве модельных регионов для проведения широкомасштабных сборов данных и реализации программ по совершенствованию системы радиационной безопасности в РНД.

Анализ динамики коллективной дозы по форме З-ДОЗ свидетельствует о росте коллективной дозы в период 2015–2020 гг. (20% в среднем за год). При этом максимальный вклад в коллективную дозу вносят высокодозовые томографические и гибридные исследования из группы «Прочие» – 56%.

Форма статистического учёта доз медицинского облучения населения в части РНД отстаёт от изменений, происходящих в отрасли, и требует внесения корректировок, отражающих внедрение новой аппаратуры и технологий в медицинскую практику.

Для детальной и достоверной оценки РНД в стране необходимо проведение более детальных выборочных исследований, направленных на определение структуры РНД, возрастного профиля пациентов и уровней облучения различных групп пациентов. Данное исследование целесообразно проводить в Санкт-Петербурге или Москве как модельных субъектах РФ. По итогам данных исследований необходимо сформулировать предложения по переработке и унификации системы сбора данных в РНД в Российской Федерации.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Чипига Л.А. – научное руководство исследованием, определение цели, разработка дизайна исследования, формулировка научных гипотез, поиск литературы, проведение расчетов, анализ полученных результатов, написание текста.

Ладанова Е.Р. – поиск литературы, проведение расчетов, описание результатов.

Водоватов А.В. – анализ и интерпретация результатов, обсуждение результатов исследования.

Звонова И.А. – анализ литературы, проверка расчетов, редактирование статьи.

Мосунов А.А. – анализ литературы, проведение расчетов, описание результатов.

Наурызбаева Л.Т. – анализ литературы, проведение расчетов, описание результатов.

Рызов С.А. – поиск и анализ литературы, редактирование статьи.

Благодарности

Авторы выражают свою благодарность Библину Артему Михайловичу и Братиловой Анжелике Анатольевне за предоставление первичных данных.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Авторы заявляют об отсутствии финансирования.

Литература

1. Наркевич Б.Я. Физико-техническое обеспечение ядерной медицины: современное состояние и перспективы развития // Радиационная онкология и ядерная медицина. 2012. № 1. С. 51-75.
2. National Council on Radiation Protection and Measurements. Medical radiation exposure of patients in the United States // NCRP Report No. 184, 2019.
3. Evaluation of medical exposure to ionizing radiation // UNSCEAR 2020/2021 Report Volume I. Annex A.
4. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К., и др. Современные принципы обеспечения радиационной безопасности при использовании источников ионизирующего излучения в медицине. Часть 1. Тенденции развития, структура лучевой диагностики и дозы медицинского облучения // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 1. С. 6-24. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-6-24.
5. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К., и др. Современные принципы обеспечения радиационной безопасности при использовании источников ионизирующего излучения в медицине. Часть 2. Радиационные риски и совершенствование системы радиационной защиты // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2. С. 6-24. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-6-24.
6. Martin A., Eckerman K., Pawel D., et al. Improved Age- and Gender-Specific Radiation Risk Models Applied on Cohorts of Swedish Patients // Radiation Protection Dosimetry. 2021. Vol. 195, No 3-4. P. 334-338. DOI: 10.1093/rpd/ncab075.
7. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2020 г. (Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации). М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2021. 130 с.
8. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2019 г. (Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации). М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2020. 136 с.
9. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2018 г. (Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации). М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2019. 130 с.
10. Радиационно-гигиенический паспорт России: Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2017 г. (Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации). М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2018. 117 с.
11. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2016 г. (Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации). М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2017. 125 с.
12. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2015 г. (Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации). М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2016. 125 с.
13. Водоватов А.В., Романович И.К., Историк О.А., и др. Предварительная оценка изменения структуры и коллективной дозы от КТ-исследований за период март-июнь 2020 г в связи с диагностикой COVID-19 в Российской Федерации. 2020. Препринт: <https://covid19-preprints.microbe.ru/article/28> (Дата обращения: 27.07.2022) DOI:10.21055/preprints-3111724.

14. Звонова И.А., Чипига Л.А., Балонов М.И., Сухов В.Ю. Радионуклидная диагностика в Санкт-Петербурге: текущее состояние и проблемы развития // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 4. С. 32-41.
15. Костылев В.А., Рыжикова О.А., Сергиенко В.Б. Статус и перспектива развития методов позитронно-эмиссионной томографии в России // Медицинская физика. 2015. № 2. С. 5-16.
16. European Commission. Medical radiation exposure of the European population // Radiation Protection. 2019. № 180, part 1/2.
17. Verberne H.J., Acampa W., Anagnostopoulos C. EANM procedural guidelines for radionuclide myocardial perfusion imaging with SPECT and SPECT/CT: 2015 revision // European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging. 2009. Vol. 36. P. 1201-1216. DOI: 10.1007/s00259-015-3139-x.
18. Kapucu Ö.L., Nobili F., Varrone A., et al. EANM procedure guideline for brain perfusion SPECT using ^{99m}Tc-labelled radiopharmaceuticals, version 2 // European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging. 2009. Vol. 36(12). P. 2093-102. DOI 10.1007/s00259-009-1266-y.
19. Балонов М.И., Голиков В.Ю., Звонова И.А., и др. Современные уровни медицинского облучения в России // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 3. С. 67-79.
20. Balonov M., Golikov V., Zvonova I., et al. Patient doses from medical examinations in Russia: 2009-2015 // Journal of Radiological Protection. 2018. Vol. 38, No 1. P. 121-139. DOI: 10.1088/1361-6498/aa9b99.
21. Балонов М.И., Голиков В.Ю., Водоватов А.В., и др. Научные основы радиационной защиты в современной медицине, Том 1. Лучевая диагностика. Под ред. профессора М.И. Балонova. СПб.: НИИРГ имени проф. П.В. Рамзаева, 2019. Т. 1. 320 с.
22. Чипига Л.А. Сравнение расчетных методов определения эффективной и органных доз у пациентов при компьютерно-томографических исследованиях // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 1. С. 56-64. DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-1-56-64.
23. Chipiga L., Golikov V., Vodovатов A., Bernhardsson C. Comparison of organ absorbed doses in whole-body computed tomography scans of paediatric and adult patient models estimated by different methods // Radiation Protection Dosimetry. 2021. Vol. 195, No 3-4. P. 246-256. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncab086>.

Поступила: 04.07.2022 г.

Чипига Лариса Александровна – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; научный сотрудник Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова; доцент кафедры ядерной медицины и радиационных технологий Национального медицинского исследовательского центра им. В.А. Алмазова Минздрава России. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: larisa.chipiga@gmail.com

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

Водоватов Александр Валерьевич – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева; доцент кафедры общей гигиены Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета, Санкт-Петербург, Россия

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

Мосунов Артем Алексеевич – студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Наурзбаева Лаура Талгатовна – студентка Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Рыжов Сергей Анатольевич – руководитель центра по радиационной безопасности и медицинской физике Научно-практического клинического центра диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

Для цитирования: Чипига Л.А., Ладанова Е.Р., Водоватов А.В., Звонова И.А., Мосунов А.А., Наурзбаева Л.Т., Рыжов С.А. Тенденции развития ядерной медицины в Российской Федерации за 2015–2020 гг. // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 122-133. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-122-133

Trends in the development of nuclear medicine in the Russian Federation for 2015–2020

Larisa A. Chipiga^{1,2,3}, Evgenia R. Ladanova¹, Aleksandr V. Vodovatov^{1,4}, Irina A. Zvonova¹, Artem A. Mosunov⁵,
Laura T. Naurzbaeva⁵, Sergey A. Ryzhov^{6,7,8}

¹Saint-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

²A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies, Saint-Petersburg, Russia

³Almazov National Medical Research Centre, Saint-Petersburg, Russia

⁴Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

⁵Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia

⁶Association of Medical Physicists in Russia, Moscow, Russia

⁷Scientific and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow Department of Health, Moscow, Russia

⁸Dmitry Rogachev National Medical Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology, the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

The federal forms of statistical reporting (3-DOZ form, form No. 30 of the Ministry of Health of the Russian Federation and radiation-hygienic passports of the subjects of the Russian Federation for 2015–2020) were analyzed in order to estimate the current status of nuclear medicine and assess the perspective and developing proposals for improving the national system of radiation protection in nuclear medicine. Over the past six years, the number of radionuclide examinations in the Russian Federation has been at the same level: on average 530 thousand per year. In 2020 the number of examinations decreased that was caused by the epidemic of coronavirus infection. The largest number of examinations in 2015–2020 were performed in Moscow (21%) and St. Petersburg (11%). Federal medical centers equipped with high-tech equipment are located in these cities, and patients from different regions are examined in these centers. The examination of bone is the most common examination in Russia: 40% from all of nuclear medicine examination; there is a moderate increase of that examinations. There is a high number of renal examinations (17%). The next most frequent are examinations of myocardium, thyroid, liver and lungs; the number of these examinations are decrease. Due to the development of modern diagnostic technologies, installation of new positron emission tomography departments and replacement of the old equipment with the new one (decrease in the number of renographs and increase of positron emission tomographs), the number of “other” examinations are increased with a factor of 3.7 since 2015 but the number of “functional” examinations is decreased. About two thousand studies per year were examined on a scanner (renograph, gamma camera, single-photon emission tomography), and about 0.6 thousand hybrid imaging examinations per year were performed on a single-photon emission tomography combined with computed tomography. The annual collective dose of radionuclide diagnosis in the country has increased from 1.2 to 3.7 thousand man-Sv since 2015. The main contribution to the collective dose in Russia was associated with “other” examinations, which include hybrid imaging and whole body positron emission tomography: 55% (39% in St. Petersburg, 60% in Moscow). Due to the limitations and heterogeneous content of the federal forms of statistical reporting it is difficult to assess the current state of nuclear medicine in the Russian Federation. The authors of the study were updated of the data collection system in the radionuclide diagnosis in 3-DOZ forms; it is under approval. For detailed and reliable assessment of the nuclear medicine in the country, it is necessary to conduct a separate survey to determine the types of nuclear medicine examinations, the gender and age profile of patients and patient doses. That survey should be conducted in St. Petersburg or Moscow, as model subjects of the Russian Federation.

Key words: nuclear medicine, radionuclide diagnostics, radionuclide therapy, scintigraphy, single-photon emission computed tomography, positron emission tomography, patient doses, collective dose.

Information about authors' personal contribution to the work on the article

Chipiga L.A. – scientific management of the study, determination of the aim of the study, development of the study design, formulation of the scientific conjectures, calculations, analysis of the results, writing the text of the article.

Ladanova E.L. – search of literature, calculations, descriptions of the results.

Vodovatov A.V. – analysis and interpretation of the results, discussion of the results.

Zvonova I.A. – analysis of literature, calculations verification, editing the draft of the article.

Mosunov A.A. – search of literature, calculations, descriptions of the results.

Larisa A. Chipiga

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

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

Naurzbaeva L.T. – search of literature, calculations, descriptions of the results.

Ryzhov S.A. – search and analysis of literature, editing the draft of the article.

Conflict of interest

The authors have no conflicts of interest to disclose.

Acknowledgements

The authors would like to thank Artem M. Biblin and Anzhelika I. Bratilova for assistance with the primary data provision.

Information about the source of funding

The study was not financially supported.

References

- Narkevich B.Ya. Current Status and Prospect Development of Nuclear Medicine Techniques. *Radiatsionnaya onkologiya i yadernaya meditsina = Radiation oncology and nuclear medicine*. 2012;1: 51-75. (In Russian)
- National Council on Radiation Protection and Measurements. Medical radiation exposure of patients in the United States. NCRP Report 184. 2019.
- UNSCEAR. Evaluation of medical exposure to ionizing radiation. UNSCEAR 2020/2021 Report Volume I. Annex A. 2021.
- Onischenko GG, Popova AYU, Romanovich IK, Vodovatov AV, Bashketova NS, Istorik OA, et al. Modern principles of the radiation protection from sources of ionizing radiation in medicine. Part 1: Trends, structure of X-ray diagnostics and doses from medical exposure. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(1): 6-24. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-6-240.
- Onischenko GG, Popova AYU, Romanovich IK, Vodovatov AV, Bashketova NS, Istorik OA, et al. Modern principles of the radiation protection from sources of ionizing radiation in medicine. Part 2: radiation risks and development of the system of radiation protection. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2): 6-24. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-6-24.
- Martin A, Eckerman K, Pawel D, Almén A, Mattsson S. Improved Age- and gender-specific radiation risk models applied on cohorts of Swedish patients. *Radiation Protection Dosimetry*. 2021;195(3-4): 334-338. DOI: 10.1093/rpd/ncab075.
- Results of radiation-hygiene passportization in regions of the Russian Federation in 2020. (Radiation- Hygienic Passport of the Russian Federation). Moscow: Rospotrebnadzor; 2021. 130 p. (In Russian)
- Results of radiation-hygiene passportization in regions of the Russian Federation in 2019. (Radiation- Hygienic Passport of the Russian Federation). Moscow: Rospotrebnadzor; 2020. 136 p. (In Russian)
- Results of radiation-hygiene passportization in regions of the Russian Federation in 2018. (Radiation- Hygienic Passport of the Russian Federation). Moscow: Rospotrebnadzor; 2019. 130 p. (In Russian)
- Results of radiation-hygiene passportization in regions of the Russian Federation in 2017. (Radiation- Hygienic Passport of the Russian Federation). Moscow: Rospotrebnadzor; 2018. 117 p. (In Russian)
- Results of radiation-hygiene passportization in regions of the Russian Federation in 2016. (Radiation- Hygienic Passport of the Russian Federation). Moscow: Rospotrebnadzor; 2017. 125 p. (In Russian)
- Results of radiation-hygiene passportization in regions of the Russian Federation in 2015. (Radiation- Hygienic Passport of the Russian Federation). Moscow: Rospotrebnadzor; 2016. 125 p. (In Russian)
- Vodovatov AV, Romanovich IK, Istorik OA, Eremina LA, Morozov SP, Ryzhov SA, et al. Preliminary assessment of changes in the structure and collective dose from CT examinations for the period March-June 2020 due to the diagnosis of COVID-19 in the Russian Federation. 2020. (In Russian) Preprint: <https://covid19-preprints.microbe.ru/article/28> (Accessed: 27.07.2022) DOI:10.21055/preprints-3111724.
- Zvonova IA, Chipiga LA, Balonov MI, Sukhov VJ. Radionuclide diagnostics in St. Petersburg: Current status and development challenges. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015; 8(4): 32-41. (In Russian)
- Kostylev VA, Ryzhikova OA, Sergienko VB. Status and prospects for the development of positron emission tomography methods in Russia. *Meditsinskaya fizika = Medical physics*. 2015;2: 5-16. (In Russian)
- European Commission. Medical radiation exposure of the European population. Radiation Protection №180, part 1/2. 2019.
- Verberne HJ, Acampa W, Anagnostopoulos C. EANM procedural guidelines for radionuclide myocardial perfusion imaging with SPECT and SPECT/CT. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2009;36: 1201-1216. DOI: 10.1007/s00259-009-1131-z.
- Kapucu ÖL, Nobili F, Varrone A, et al. EANM procedure guideline for brain perfusion SPECT using ^{99m}Tc-labelled radiopharmaceuticals, version 2. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2009;36(12): 2093-102. DOI 10.1007/s00259-009-1266-y.
- Balonov MI, Golikov VYu, Zvonova IA, et al. Current levels of medical exposures in Russia. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(3): 67-79. (In Russian)
- Balonov M, Golikov V, Zvonova I, et al. Patient doses from medical examinations in Russia: 2009-2015. *Journal of Radiological Protection*. 2018;38(1): 121-139. DOI: 10.1088/1361-6498/aa9b99.
- Balonov MI, Golikov VYu, Vodovatov AV, et al. Scientific foundations of radiation protection in modern medicine. Volume 1. X-ray diagnostics. By edit. professor MI Balonov. Saint-Petersburg: NIIRG named after prof. PV Ramzaev; 2019. Vol.1, 320 p. (In Russian)
- Chipiga LA. A comparison of computational methods for estimation of effective and organ doses to the patients from CT examination. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(1): 56-64. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-1-56-64.
- Chipiga L, Golikov V, Vodovatov A, Bernhardsson C. Comparison of organ absorbed doses in whole-body computed tomography scans of paediatric and adult patient models estimated by different methods. *Radiation Protection Dosimetry*. 2021;195(3-4): 246-256. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncab086>.

Received: July 04, 2022

For correspondence: Larisa A. Chipiga – Ph.D., research fellow, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; research fellow, A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies; docent, Almazov National Medical Research Centre. (Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: larisa.chipiga@gmail.com)

Evgenia R. Ladanova – Graduate student, Junior Researcher, Protection Laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

Aleksandr V. Vodovatov – Ph.D., Head of Protection Laboratory, Leading Researcher, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; docent, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

Irina A. Zvonova – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Chief Researcher of Protection Laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

Artem A. Mosunov – student, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia

Laura T. Naurzbaeva – student, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia

Sergey A. Ryzhov – head of radiation protection and medical physics center, Research and Practical Clinical Centre of Diagnostics and Telemedicine Technologies of Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia

For citation: Chipiga L.A., Ladanova E.R., Vodovatov A.V., Zvonova I.A., Mosunov A.A., Naurzbaeva L.T., Ryzhov S.A. Trends in the development of radionuclide diagnostics in the Russian Federation for 2015–2020. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 4. P. 122-133. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-122-133

Формирование блока данных об уровнях облучения населения России для включения в Государственный доклад о состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации

А.Н. Барковский¹, Т.А. Кормановская¹, А.В. Водоватов^{1,2}, А.А. Братилова¹, О.Е. Тутельян³,
А.М. Библин¹, Руслан Р. Ахматдинов¹

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

² Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

³ Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, Россия

В статье рассматриваются вопросы формирования блока данных об уровнях облучения населения России для включения в Государственный доклад о состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации, представляемый Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. Показано, что источниками информации о радиационной обстановке и дозах облучения населения являются система социально-гигиенического мониторинга, единая государственная система контроля и учета доз облучения граждан и радиационно-гигиеническая паспортизация, функционирующие под контролем учреждений Роспотребнадзора.

Ключевые слова: источники ионизирующего излучения, социально-гигиенический мониторинг, единая государственная система контроля и учета доз облучения граждан, радиационно-гигиеническая паспортизация, Роспотребнадзор.

Введение

Контроль уровней облучения населения Российской Федерации источниками ионизирующего излучения (ИИИ) является неотъемлемой частью мероприятий, проводимых Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека в целях улучшения здоровья граждан. В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 23 мая 2012 г. № 513¹ данные о показателях радиационной обстановки на территории страны, а также о дозах облучения населения за счет всех видов облучения ежегодно приводятся в Государственном докладе о состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской

Федерации, представляемом Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.

Основными ИИИ, определяющими дозы облучения населения Российской Федерации, являются техногенные ИИИ в условиях их нормального использования, природные ИИИ, медицинские ИИИ и техногенное радиоактивное загрязнение, являющееся результатом радиационных аварий и прошлой деятельности (техногенный фон). На основании данных обо всех параметрах облучения жителей России формируется раздел «Мониторинг радиационной обстановки и доз облучения населения» Государственного доклада о состоянии са-

¹ Постановление Правительства РФ от 23 мая 2012 г. № 513 «О государственном докладе о состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации» [Decree of the Government of the Russian Federation N 513, 22.05.2022 "On the State report on the evaluation of sanitary-epidemiological well-being of public in the Russian Federation" (In Russ.)]

Водоватов Александр Валерьевич

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

нитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации.

Источники информации об уровнях облучения населения России для включения в Государственный доклад о состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации

Основными источниками информации о радиационной обстановке и дозах облучения населения являются проводимый ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии» социально-гигиенический мониторинг, Единая государственная система контроля и учета доз облучения населения (ЕСКИД) и радиационно-гигиеническая паспортизация, проводимая под контролем учреждений Роспотребнадзора и являющаяся государственной системой оценки влияния основных ИИИ, направленной на обеспечение радиационной безопасности населения страны [1, 2]. Именно Роспотребнадзор является гарантом достоверности и качества информации, получаемой в рамках данных систем мониторинга.

В «Основах государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу», утвержденных Указом Президента Российской Федерации от 13.10.2018 г. № 585², единая государственная система мониторинга радиационной обстановки на территории Российской Федерации, единая государственная система контроля и учета индивидуальных доз облучения и система радиационно-гигиенической паспортизации организаций и территорий названы в числе основных инструментов их реализации.

Формирование блоков информации об уровнях облучения населения России для включения в Государственный доклад о состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации

Техногенное облучение

Информация о состоянии радиационной безопасности на радиационных объектах, функционирующих на территории Российской Федерации, и дозах облучения населения Российской Федерации за счет нормальной эксплуатации техногенных ИИИ для включения в Государственный доклад формируется на основании анализа данных, получаемых в рамках радиационно-гигиенической паспортизации территорий субъектов Российской Федерации, а также поступающих в Федеральный банк данных по ин-

дивидуальным дозам облучения персонала радиационных объектов (ФБД ДОП) в рамках ЕСКИД.

ФБД ДОП включает в себя данные об индивидуальных дозах облучения персонала организаций, осуществляющих деятельность с использованием техногенных источников ионизирующих излучений в условиях их нормальной эксплуатации, при планируемом повышенном облучении и в условиях радиационной аварии, а также индивидуальные дозы облучения граждан, подвергшихся аварийному облучению.

Функционирование ФБД ДОП обеспечивает решение следующих основных задач:

- организация и контроль соблюдения метрологических, технических и информационных требований к контролю индивидуальных доз облучения персонала;
- организация и проведение контроля и учета индивидуальных доз облучения персонала от техногенных ИИИ;
- ведение учета индивидуальных доз облучения персонала;
- ведение банков данных индивидуальных доз облучения персонала на объектовом, региональном и федеральном уровнях;
- подготовка ежегодного отчета по индивидуальным дозам облучения персонала и граждан Российской Федерации, подвергшихся облучению от техногенных ИИИ.

Информация на объектовом уровне от организаций, в которых производятся работы с техногенными источниками ионизирующих излучений, готовится по форме федерального государственного статистического наблюдения № 1-ДОЗ «Сведения о дозах облучения лиц из персонала в условиях нормальной эксплуатации техногенных источников ионизирующего излучения» и № 2-ДОЗ «Сведения о дозах облучения лиц из персонала в условиях радиационной аварии или планируемого повышенного облучения, а также лиц из населения, подвергшегося аварийному облучению», утвержденных приказом Росстата № 411 от 16.10.2013³. Заполнение формы № 1-ДОЗ и № 2-ДОЗ осуществляется в соответствии с методическими рекомендациями «Заполнение форм федерального государственного статистического наблюдения № 1-ДОЗ» и «Заполнение форм федерального государственного статистического наблюдения № 2-ДОЗ».

В рамках радиационно-гигиенической паспортизации формируется следующая информация:

- об общем количестве радиационных объектов в Российской Федерации, в том числе по видам организаций (атомные электростанции, геологоразведочные и добывающие, медицинские, промышленные, научные

² Указ Президента РФ от 13 октября 2018 г. № 585 «Об утверждении Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу» [Decree of the President of the Russian Federation N 585, 13.10.2018 “On the establishment of the Basics of state policy on the provision of nuclear and radiation safety of the Russian Federation up to 2025 and for the future perspective” (In Russ.)]

³ Приказ Росстата от 16.10.2013 г. № 411 «Об утверждении статистического инструментария для организации Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека федерального статистического наблюдения за санитарным состоянием территорий, профессиональными заболеваниями (отравлениями), дозами облучения» [Order of Rosstat N 411, 16.10.2013 “On the establishment of the statistical instruments for the management by the Federal service of surveillance on consumer rights protection and human well-being of federal statistical surveillance on the sanitary situation of territories, professional diseases (poisonings), doses” (In Russ.)]

и учебные, таможенные, пункты захоронения РАО, прочие особо радиационно опасные, прочие);

- об общем количестве установок с техногенными ИИИ, в том числе по типам;

- об общей численности персонала радиационных объектов группы А и группы Б, в том числе по видам организаций;

- об удельной активности радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в почве, воде и пищевой продукции;

- о средних и максимальных за год значениях суммарной бета-активности атмосферного воздуха в субъектах Российской Федерации;

- о характере и количестве радиационных аварий, имевших место в отчетном году.

Данные о численности населения, проживающего на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС и производственной деятельности ПО «Маяк», а также о годовых эффективных дозах облучения жителей за счет радиоактивного загрязнения территории формируются на основе анализа результатов радиационного мониторинга, проводимого Центрами гигиены и эпидемиологии в субъектах Российской Федерации и специалистами ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева.

В Государственном докладе представлены следующие показатели ситуации с техногенным облучением в Российской Федерации:

- количество радиационных объектов;

- численность персонала, работающего с техногенными источниками ионизирующего излучения;

- средние индивидуальные дозы облучения персонала радиационных объектов;

- число лиц из персонала с годовой индивидуальной дозой производственного облучения более 20 мЗв/год для персонала группы А и более 5 мЗв/год для персонала группы Б;

- численность, средние и максимальные индивидуальные дозы производственного облучения персонала групп А и Б в организациях различного вида;

- коллективная доза техногенного производственного облучения персонала радиационных объектов.

Природное облучение

Сведения о числе обследованных источников питьевого водоснабжения по показателям радиационной безопасности и доле проб с превышением уровней предварительной оценки по суммарной удельной альфа- или бета-активности, об удельных активностях природных и техногенных радионуклидов в питьевой воде субъектов Российской Федерации, о количестве помещений жилых, общественных и производственных зданий, обследованных на содержание радона в воздухе и о доле превышений установленных гигиенических нормативов по данному фактору, о распределении исследованных

проб, используемых на территории страны минерального сырья и строительных материалов по классам, результаты исследований проб продовольственного сырья и пищевых продуктов на содержание радиоактивных веществ формируются на основе данных формы федерального статистического наблюдения № 18 «Сведения о санитарном состоянии субъекта Российской Федерации», утвержденной приказом Росстата от 24.12.2019 № 800 «Об утверждении формы». Информация представляется в динамике за 10 лет.

Сведения об уровнях мощности дозы гамма-излучения в помещениях и на открытой местности, об ЭРОА радона в воздухе помещений, о поверхностной плотности радиоактивного загрязнения почвы техногенными радионуклидами, об объемной активности радиоактивных веществ в атмосферном воздухе, об их удельной активности в воде открытых водоемов, в питьевой воде и в пищевых продуктах собираются центрами гигиены и эпидемиологии в субъектах Российской Федерации в рамках социально-гигиенического мониторинга. Полученные данные включаются в радиационно-гигиенические паспорта субъектов Российской Федерации и в Федеральный банк данных по дозам облучения граждан Российской Федерации за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона (ФБД ОПИ).

Информация о дозах облучения населения Российской Федерации за счет природных ИИИ для включения в Государственный доклад формируется на основании анализа многолетних данных, собранных в ФБД ОПИ, функционирующем с 2001 г. в соответствии с Приказом Минздрава Российской Федерации от 31.07.2000 г. № 298⁴ в рамках ЕСКИД, порядок создания которой был установлен Постановлением Правительства Российской Федерации от 16.06.1997 г. № 718⁵.

Сбор информации об уровнях природного облучения населения в рамках ЕСКИД предусматривает включение в нее данных всех измерений факторов природного облучения, выполненных на территории страны, проводимых в отчетном году всеми лабораториями радиационного контроля (ЛРК) в России, аккредитованными на соответствующие виды исследований в части природных ИИИ (независимо от форм собственности и ведомственной принадлежности), в том числе, конечно, испытательными лабораториями ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии» Роспотребнадзора.

Система передачи информации о параметрах радиационной обстановки в части природного облучения населения, организованная посредством единого программного обеспечения, является трехступенчатой: первичная информация по результатам выполненных исследований вносится самой ЛРК в соответствии с протоколами радиационного обследования (лабораторных измерений, испытаний); далее данные по региону собираются специалистами ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии» субъ-

⁴ Приказ Минздрава Российской Федерации от 31 июля 2000 г. № 298 «Об утверждении Положения о единой государственной системе контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан» [Order of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation N 298, 31.07.2000 "On the establishment of the Decree on the joint state system of control and accounting of the individual doses of citizens" (In Russ.)]

⁵ Постановление Правительства Российской Федерации от 16.06.1997 г. № 718 «О порядке создания единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан» [Decree of the Government of the Russian Federation #718, 16.06.1997 "On the order of creation of the joint state system of control and accounting of the individual doses of citizens" (In Russ.)]

екта Российской Федерации в региональном банке данных по дозам облучения граждан Российской Федерации за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона (РБД ОПИ), затем информация от всех РБД ОПИ аккумулируется в ФБД ОПИ, за ведение и функционирование которого отвечает ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева [3].

В соответствии с Положением о ФБД ОПИ, утвержденным Приказом Минздрава Российской Федерации от 21.06.2003 г. № 268⁶, «в рамках ФБД ОПИ контролируются и учитываются следующие виды облучения граждан Российской Федерации:

- внешнее гамма-облучение граждан в жилых и общественных зданиях и на открытой местности на территории населенных пунктов;
- внутреннее облучение граждан изотопами радона и их короткоживущими дочерними продуктами распада в жилых и общественных зданиях;
- внутреннее облучение граждан за счет природных радионуклидов в продуктах питания и питьевой воде;
- внутреннее облучение граждан за счет ингаляционного поступления долгоживущих природных радионуклидов с атмосферным воздухом на территории населенных пунктов;
- внешнее облучение за счет космического излучения на поверхности земли и внутреннее облучение за счет ⁴⁰K (не контролируются, но учитываются при оценке суммарных эффективных доз облучения граждан)».

Ежегодные данные о дозах облучения за счет каждого фактора, сформированные в форме федерального статистического наблюдения № 4-ДОЗ, утвержденной Приказом Росстата от 16.10.2013 № 411, представляются в РБД ОПИ и в ФБД ОПИ [4].

Из всех видов облучения человека именно облучение за счет природных ИИИ является наиболее стабильным показателем, так как его величина определяется географическими, климатическими, геологическими и геофизическими характеристиками территории, неизменными в течение многих лет [5]. Поэтому наиболее объективными оценками средних годовых эффективных индивидуальных доз природного облучения населения являются оценки, выполненные на основе всех аккумулированных с 2001 г. в ФБД ОПИ данных измерений показателей природных ИИИ, ежегодно уточняемые с поступлением в ФБД ОПИ новых сведений. Обобщенные за период не менее 5 лет данные о дозах облучения населения за счет природных ИИИ представляются в радиационно-гигиенических паспортах территорий [6].

На основании массива многолетних данных о параметрах природного облучения населения России, собранных и проанализированных специалистами Роспотребнадзора, формируется блок информации о дозах облучения населения Российской Федерации за счет природных ИИИ для включения в Государственный доклад о состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации.

Медицинское облучение

Информация о дозах облучения населения Российской Федерации за счет медицинских ИИИ для включения в Государственный доклад формируется на базе данных из Федерального банка данных по индивидуальным дозам облучения граждан при проведении медицинских диагностических рентгенорадиологических процедур (ФБДМ), функционирующего на базе ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева. ФБДМ содержит в себе информацию о структуре лучевой диагностики с применением ИИИ и коллективных дозах от наиболее распространенных рентгенорадиологических исследований на объектовом, региональном и федеральном уровнях.

Объектовый уровень включает банки (ОБДМ), формируемые в медицинских учреждениях, проводящих диагностические исследования с применением медицинских диагностических рентгенорадиологических процедур. На объектовом уровне ведется ежегодный учет структуры лучевой диагностики: числа рентгенографических, флюорографических, рентгеноскопических, компьютерно-томографических, интервенционных, диагностических радионуклидных и прочих исследований различных анатомических областей, выполненных на аналоговых и цифровых аппаратах. Для каждого рентгенорадиологического исследования, каждой анатомической области в рамках контроля и учета доз определяются средние индивидуальные годовые эффективные дозы в соответствии с утвержденными методиками^{7,8}. На основе данных о числе выполненных рентгенорадиологических исследований и годовых коллективных эффективных дозах, сформированных за счет этих исследований, определяют средние дозы на процедуру от каждого рентгенорадиологического исследования и средние годовые эффективные дозы в расчете на душу населения для основных видов медицинской визуализации. Информация на объектовом уровне готовится по форме федерального статистического наблюдения № 3-ДОЗ «Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгенорадиологических исследований», утвержденной постановлением Госкомстата

⁶ Приказ Минздрава Российской Федерации от 21 июня 2003 г. № 268 «Об утверждении положений о федеральных банках данных» [Order of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation N 268, 21.07.2003 "On the establishment of provision on the federal data banks" (In Russ.)]

⁷ Методические указания МУ 2.6.1.3584-19 «Изменения в МУ 2.6.1.2944-11 «Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований» – Методические документы от 30.10.2019 № МУ 2.6.1.3584-19 [Methodical guidelines MU 2.6.1.3584-19 "Changes in MU 2.6.1.2944-11 "Control of the effective doses of patients from medical X-ray examinations" (In Russ.)]

⁸ Методические указания МУ 2.6.1.3700-21 «Оценка и учет эффективных доз у пациентов при проведении радионуклидных диагностических исследований» [Methodical guidelines MU 2.6.1.3700-21 "Assessment and accounting of patient effective doses from nuclear medicine diagnostic examinations" (In Russ.)]

⁹ Методические рекомендации МР 2.6.1.1... - 14 «Заполнение формы федерального государственного статистического наблюдения №3-ДОЗ» [Methodical recommendations MR 2.6.1.1... - 14 "Filling out the form of federal state statistical surveillance 3-DOZ" (In Russ.)]

России № 51 от 21.09.2006 г. Заполнение формы № 3-ДОЗ осуществляется в соответствии с методическими рекомендациями «Заполнение форм федерального государственного статистического наблюдения № 3-ДОЗ»⁹.

Полученные сведения передаются на региональный уровень в РБДМ, которые формируются в ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии» Роспотребнадзора субъектов РФ. На уровне субъекта РФ усредняются данные по медицинским организациям субъекта РФ. Из субъектов Российской Федерации подготовленная информация передается в Федеральный банк ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, где происходит обобщение всей полученной информации на федеральном уровне.

В Государственном докладе представлены следующие показатели ситуации с медицинским облучением в Российской Федерации:

- динамика вклада основных видов рентгенорадиологических исследований в структуру лучевой диагностики в Российской Федерации;
- динамика вклада основных видов рентгенорадиологических исследований в структуру коллективной дозы от медицинского облучения в Российской Федерации;
- динамика изменения средней годовой эффективной дозы медицинского облучения в расчете на душу населения в Российской Федерации.

Следует отметить, что медицинское облучение является основным фактором воздействия техногенных ИИИ на население Российской Федерации. Вклад медицинского облучения в коллективную дозу населения РФ в 2021 г. составляет порядка 20%, уступая только вкладу природного облучения. За последние годы наблюдается стабильный рост вклада медицинского облучения за счет внедрения в практику современных высокодозовых методов лучевой диагностики (компьютерной томографии, гибридных технологий ядерной медицины и пр.) [7, 8]. Таким образом, предоставление объективной оперативной информации о ситуации с медицинским облучением в РФ необходимо для управления дозами облучения пациентов и принятия соответствующих управленческих решений.

На основе анализа данных о техногенном, природном и медицинском облучении населения Российской Федерации формируется информация о структуре дозовой нагрузки населения субъектов Российской Федерации и России в целом для включения в государственный доклад.

Формирование блока информации о радиационном риске

Источником сведений, необходимых для расчёта показателей радиационного риска для здоровья населения Российской Федерации для включения в Государственный доклад, является Федеральный банк данных радиационно-гигиенической паспортизации территорий (ФБД-РГПт). Данные в ФБД-РГПт ежегодно поступают из региональных банков данных по радиационно-гигиеническим

паспортам Управлений Роспотребнадзора субъектов Российской Федерации. Методической основой при расчете радиационных рисков для включения результатов в Государственный доклад являются методические рекомендации МР 2.6.1.0145-19 «Расчет показателей радиационного риска по данным, содержащимся в радиационно-гигиенических паспортах территорий, для обеспечения комплексной сравнительной оценки состояния радиационной безопасности населения субъектов Российской Федерации», разработанные ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева¹⁰. Методические подходы к расчету показателей радиационного риска в МР 2.6.1.0145-19 были ранее опубликованы в ряде научных статей [9, 10].

Для автоматизации и визуализации результатов расчета использовалось специализированное программное обеспечение, разработанное ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева:

1. «Расчет показателей радиационного риска по данным РГПт».
2. ГИС «Радиационные риски населения Российской Федерации по данным радиационно-гигиенической паспортизации» [11].

В Государственном докладе представлены следующие показатели среднего индивидуального пожизненного риска:

- населения Российской Федерации от воздействия радона и его дочерних продуктов распада;
- населения Российской Федерации, проживающего на радиоактивно загрязненных территориях;
- населения Российской Федерации, проживающего в зонах наблюдения радиационно опасных объектов;
- персонала радиационных объектов;
- населения Российской Федерации за счет медицинского облучения пациентов.

Представление результатов использования методологии оценки радиационного риска в Государственном докладе позволяет повысить эффективность комплексной сравнительной оценки воздействия радиационного фактора на население Российской Федерации.

Заключение

На сегодняшний день описанная в настоящей работе система сбора и анализа данных, использующаяся при подготовке Государственного доклада, позволяет получать полную и объективную информацию обо всех ИИИ (техногенных, медицинских, природных) и обусловленных ими дозах облучения и радиационных рисках населения Российской Федерации. Система ЕСКИД и радиационно-гигиенической паспортизации охватывает все объекты, осуществляющие обращение с техногенными ИИИ (включая медицинские организации), надзор за которыми осуществляют Роспотребнадзор и ФМБА России, а также подведомственные МВД России, Минобороны России, ФСБ России, ФСИН России, Росгвардии и Управлению делами Президента России. Информация, представлен-

¹⁰ МР 2.6.1.0145-19 «Расчет показателей радиационного риска по данным, содержащимся в радиационно-гигиенических паспортах территорий, для обеспечения комплексной сравнительной оценки состояния радиационной безопасности населения субъектов Российской Федерации» [MR 2.6.1.0145-19 "Calculation of indicators of radiation risk based on data from radiation-hygiene passports of territories for the complex comparative assessment of the radiation safety of the public of regions of the Russian Federation" (In Russ.)]

ная в Государственном докладе, является репрезентативной и позволяет при необходимости своевременно принимать управленческие решения по управлению радиационными рисками, основываясь на объективной информации о вкладах различных ИИИ и трендах развития различных областей их применения.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Барковский А.Н. – руководство исследованием, определение цели, подготовка раздела по техногенному облучению;

Кормановская Т.А. – подготовка раздела по природно-му облучению;

Водоватов А.В. – сведение и подготовка итоговой версии статьи, работа с рецензентами, подготовка раздела по медицинскому облучению;

Братилова А.А. – обработка данных по медицинскому облучению;

Тутельян О.Е. – обработка данных по системам учета индивидуальных доз облучения персонала;

Библин А.М. – подготовка раздела по оценке радиационных рисков;

Ахматдинов Руслан Р. – сбор исходных данных для подготовки разделов.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К. и др. Радиационно-гигиеническая паспортизация и ЕСКИД – информационная основа принятия управленческих решений по обеспечению радиационной безопасности населения Российской Федерации. Сообщение 1. Основные достижения и задачи по совершенствованию // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 3. С. 7-17. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-3-7-17>.
2. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К., Барковский А.Н., Кормановская Т.А., Шевкун И.Г. Радиационно-гигиеническая паспортизация и ЕСКИД – информационная основа принятия управленческих решений по обеспечению радиационной безопасности населения Российской Федерации. Сообщение 2. Характеристика источников и доз облучения населения Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 3. С. 18-35. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-3-18-35>.
3. Кормановская Т.А., Ахматдинов Руслан Р., Горский Г.А. Итоги 20 лет функционирования Федерального банка данных по дозам природного облучения населения Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 3. С. 112-125. DOI 10.21514/1998-426X-2021-14-3-112-125.
4. Барковский А.Н., Ахматдинов Руслан Р., Ахматдинов Рустам Р. и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2020 г. // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 4. С. 103-113.
5. Романович И.К., Стамат И.П., Кормановская Т.А. и др. «Природные источники ионизирующего излучения: дозы облучения, радиационные риски, профилактические мероприятия» Под редакцией академика РАН Г.Г. Онищенко и профессора А.Ю. Поповой. Санкт-Петербург, 2018. 431 с.
6. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2020 г. (Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации). М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2021. 130 с.
7. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К. и др. Современные принципы обеспечения радиационной безопасности при использовании источников ионизирующего излучения в медицине. Часть 1. Тенденции развития, структура лучевой диагностики и дозы медицинского облучения // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 1. С. 6-24. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-1-6-24>.
8. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К. и др. Современные принципы обеспечения радиационной безопасности при использовании источников ионизирующего излучения в медицине. Часть 2. Радиационные риски и совершенствование системы радиационной защиты // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2. С. 6-24. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-2-6-24>.
9. Кононенко Д.В., Кормановская Т.А. Оценка риска при облучении радоном для населения субъектов Российской Федерации на основе данных радиационно-гигиенического паспорта территории // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 4. С. 15-22.
10. Голиков В.Ю. Оценка рисков медицинского облучения на основе данных радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 4. С. 6-14.
11. Ахматдинов Руслан Р., Библин А.М., Репин Л.В. Разработка автоматизированной системы оценки радиационных рисков населения Российской Федерации по данным радиационно-гигиенической паспортизации территорий // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 4. С. 114-121. DOI 10.21514/1998-426X-2021-14-4-114-121.

Поступила: 24.10.2022 г.

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

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

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

Братилова Анжелика Анатольевна – научный сотрудник лаборатории внутреннего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Тутельян Ольга Евгеньевна – кандидат медицинских наук, заведующий лабораторией радиационного контроля и физических факторов отдела лабораторного дела Федерального центра гигиены и эпидемиологии Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, Россия

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

Ахматдинов Руслан Расимович – младший научный сотрудник Информационно-аналитического центра Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Барковский А.Н., Кормановская Т.А., Водоватов А.В., Братилова А.А., Тутельян О.Е., Библин А.М., Ахматдинов Руслан Р. Формирование блока данных об уровнях облучения населения России для включения в Государственный доклад о состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 134-141. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-134-141

Management of data on the exposure of the Russian population for the State report on evaluation of sanitary-epidemiological well-being of the public in the Russian Federation

Anatoly N. Barkovsky¹, Tatyana A. Kormanovskaya¹, Aleksandr V. Vodovатов^{1,2}, Anzhelika A. Bratilova¹, Olga E. Tutelyan³, Artem M. Biblin¹, Ruslan R. Akhmatdinov¹

¹Saint-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

²Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

³Federal Center of Hygiene and Epidemiology of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Moscow, Russia

This study is focused on the description of management of data on the exposure of the Russian population for the State report on the evaluation of sanitary-epidemiological well-being of public in the Russian Federation, that was presented by the Federal service of surveillance on consumer rights protection and human well-being. It is shown that the main sources of data on the radiation situation and public exposure are system of social-hygienic monitoring, Joint state system of control and accounting of public doses; and radiation-hygienic passportization, functioning under the control of Rospotrebnadzor facilities.

Key words: sources of ionizing exposure, social-hygienic monitoring, Joint state system of control and accounting of public doses, Rospotrebnadzor.

Author contribution

Barkovsky A.N. – supervision of the study, determination of aims and objectives, preparation of the section on man-made exposure.

Kormanovskaya T.A. – preparation of the section on natural exposure.

Vodovатов A.V. – preparation of the final draft of the manuscript, communication with reviewers, preparation of the

section on medical exposure.

Bratilova A.A. – processing of data on medical exposure.

Tutelyan O.E. – processing of data on staff individual doses.

Biblin A.M. – preparation of the section on radiation risk assessment.

Akhmatdinov Ruslan R. – collection of the initial data for the study.

Aleksandr V. Vodovатов

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

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

Conflict of interests

Authors declare on the absence of the conflicts of interest.

References

1. Onishchenko GG, Popova AYu, Romanovich IK, Barkovsky AN, Kormanovskaya TA, Shevkun IG. Radiation-hygienic passportization and USIDC-information basis for management decision making for radiation safety of the population of the Russian Federation. Report 1. Main achievements and challenges to improve. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(3):7-17. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-3-7-17>.
2. Onishchenko GG, Popova AYu, Romanovich IK, Barkovsky AN, Kormanovskaya TA, Shevkun I.G. Radiation-hygienic passportization and USIDC-information basis for management decision making for radiation safety of the population of the Russian Federation Report 2: Characteristics of the sources and exposure doses of the population of the RF. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(3):18-35. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-3-18-35>.
3. Kormanovskaya TA, Akhmatdinov Ruslan R, Gorskiy GA. Results of the 20-year period of functioning of the Federal Databank on the natural radiation doses to the population of the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(3):112-125. (In Russ.) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-3-112-125>.
4. Barkovsky AN, Akhmatdinov Ruslan R, Akhmatdinov Rustam R, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Radiation doses to the population of the Russian Federation in 2020. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(4):103-113. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-4-103-113>.
5. Romanovich IK, Stamat IP, Kormanovskaya TA, Kononenko DV, et al. «Natural sources of ionizing exposure: doses, radiation risks, prophylactic measures. Edited by academician of RAS G.G. Onischenko and prof. A. Yu. Popova. Saint-Petersburg, 2018. 431 p. (In Russian).
6. Results of radiation-hygienic passportisation in subjects of the Russian Federation on 2020 (Radiation-hygienic passport of the Russian Federation). Moscow: Federal service of surveillance on consumer rights protection and human well-being, 2021. 130 p. (In Russian).
7. Onischenko GG, Popova AYu, Romanovich IK, Vodovatov AV, Bashketova NS, Istorik OA, et al. Modern principles of the radiation protection from sources of ionizing radiation in medicine. Part 1: Trends, structure of x-ray diagnostics and doses from medical exposure. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(1):6-24. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-1-6-24>.
8. Onischenko GG, Popova AYu, Romanovich IK, Vodovatov AV, Bashketova NS, Istorik OA, et al. Modern principles of the radiation protection from sources of ionizing radiation in medicine. Part 2: radiation risks and development of the system of radiation protection. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2):6-24. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-2-6-24>.
9. Kononenko DV, Kormanovskaya TA. Risk assessment for the population of regions of the Russian Federation from exposure to radon based on data from radiation-hygienic passports of territories. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(4):15-22. (In Russian).
10. Golikov VYu. Medical irradiation risk assessment based on the data of radiation-hygienic passportization in the regions of the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(4):6-14. (In Russian).
11. Akhmatdinov Ruslan R, Biblin AM, Repin LV. Development of the automated system for assessing radiation risks to the population of the Russian Federation based on the data of radiation-hygienic certification of territories. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(4):114-121. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-4-114-121>.

Received: October 24, 2022

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

Tatyana A. Kormanovskaya – PhD in Biology, Leading Researcher, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint Petersburg, Russia

For correspondence: Aleksandr V. Vodovatov – Ph.D., Head of Laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; docent, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: vodovatoff@gmail.com)

Anzhelika A. Bratilova – Research Fellow of Internal Radiation Laboratory 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

Olga E. Tutelyan – Candidate of Medical Sciences, Radiation Control and Physical Factors Laboratory Head, Federal Hygiene and Epidemiology Center Laboratory Studies, Moscow, Russia

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

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

For citation: Barkovsky A.N., Kormanovskaya T.A., Vodovatov A.V., Bratilova A.A., Tutelyan O.E., Biblin A.M., Akhmatdinov R.R. Management of data on the exposure of the Russian population for the State report on the evaluation of sanitary-epidemiological well-being of public in the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 4, P. 134-141. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-134-141

Метод обработки спектра при измерении детектором NaI(Tl) малых уровней удельной активности ^{137}Cs в присутствии природных радионуклидов

В.С. Репин, К.А. Седнев

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

При измерении малых уровней содержания ^{137}Cs в пробах почвы на спектрометрах с детектором NaI(Tl) идентификация пика $^{137\text{m}}\text{Ba}$ (662 кэВ гамма-линия этого дочернего радионуклида) затрудняется за счет влияния природных радионуклидов, пики которых попадают в область регистрации $^{137\text{m}}\text{Ba}$. Для идентификации и оценки площади под пиком $^{137\text{m}}\text{Ba}$ необходимо знать вклад в данную область фоновой составляющей и отдельный вклад каждого природного радионуклида. При использовании данного подхода точность оценки площади фотопика $^{137\text{m}}\text{Ba}$ зависит от точности, с которой будут определены уровни природных радионуклидов. В статье предложен метод обработки спектра, основанный на учете индивидуальных параметров спектрометра и более точном определении удельных активностей природных радионуклидов. Метод включает моделирование участков спектра каждого природного радионуклида в области пика $^{137\text{m}}\text{Ba}$ и вычитание моделируемых участков и фонового спектра из суммарного спектра под пиком $^{137\text{m}}\text{Ba}$. Использование данного подхода позволяет измерять с детектором NaI(Tl) размером 63×63 удельные активности ^{137}Cs в геометрии Маринелли объемом 1 л на уровне 0,7–1 Бк/кг с неопределенностью 30–50% при времени измерений 6 ч.

Ключевые слова: гамма-спектрометрия, декомпозиция спектра, цезий-137, природные радионуклиды, градуировка спектрометра.

Введение

Задача измерения малых уровней содержания ^{137}Cs в объектах окружающей среды возникает при изучении радиологических характеристик территорий, не подвергшихся аварийному радиоактивному загрязнению, но содержащих данный радионуклид за счет глобальных выпадений при испытаниях ядерного оружия в атмосфере. Такого рода задача возникает, например, при определении наличия дополнительного радиоактивного загрязнения ^{137}Cs вблизи мест проведения мирных ядерных взрывов [1, 2]. В последнем случае необходимо сравнивать уровни данного радионуклида в пробах, полученных на контрольной и исследуемой территории. Методы гамма-спектрометрии с использованием детекторов на основе NaI(Tl) нашли широкое применение при измерении радионуклидов в пробах окружающей среды в силу высокой эффективности регистрации гамма-излучений и низкой стоимости, однако детекторы данного типа обладают низким энергетическим разрешением, приводящим к необходимости привлекать методы математической обработки спектров [3–6]. Развитие и совершенствование

методов обработки спектров, полученных с детекторами NaI(Tl), продолжается до настоящего времени, несмотря на появление ППД-спектрометров [7–16], а практическая реализация методов обработки воплощается в коммерческих компьютерных программах [3–6]. Типовой задачей в области гамма-спектрометрии на основе NaI(Tl) является декомпозиция гамма-спектра с целью количественного определения содержания радионуклидов в пробе. Упрощенный вариант этой задачи – определение активности отдельных радионуклидов для заведомо известного радионуклидного состава, в частности, для проб почвы – определение содержания природных радионуклидов и ^{137}Cs .

Существуют различные алгоритмы декомпозиции гамма-спектров [8, 10, 11, 12, 14]. Оконный метод, несмотря на простоту, дает большие погрешности оценок даже при сравнительно длительных измерениях, поскольку к ошибке статистики набора числа импульсов под фотопиками полного поглощения добавляется ошибка, связанная с учетом взаимных вкладов: ^{232}Th в окна ^{40}K и ^{226}Ra , ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в окно ^{137}Cs . Более надежные оценки

Репин Виктор Степанович

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

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

дает анализ полного спектра [14], однако при малых уровнях содержания ^{137}Cs в пробе данный метод не позволяет с приемлемой точностью оценивать его активность.

Цель исследования – разработка методики обработки спектра, полученного с детектором NaI(Tl), позволяющей дать более точную оценку малых уровней ^{137}Cs в пробах почвы с использованием метода анализа всего спектра.

Материалы и методы

Для разработки алгоритма проведена серия градуировочных измерений ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K с известной удельной активностью (УА). Счетные образцы данных радионуклидов готовили на основе кварцевого песка и помещали в сосуды «Маринелли», используемые в качестве одной из стандартных емкостей для измерения проб. Счетные образцы ^{226}Ra и ^{232}Th герметично закрывали и выдерживали 2 недели с целью предотвращения выхода радона и торона и обеспечения равновесия дочерних радионуклидов. Измерения спектров выполнены на спектрометре с детектором NaI(Tl) размером 63×63 мм, помещенном в свинцовую защиту. Измерение спектра фонового образца кварцевого песка длилось 24 ч с целью получения более гладкой формы всех участков спектра, используемых для декомпозиции спектров природных радионуклидов. Измерения счетных образцов ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K длилось 6 ч, что также обеспечивало более высокую гладкость спектров. Измерения градуировочных образцов ^{137}Cs выполняли для определения эффективности регистрации данного радионуклида по пику полного поглощения, то есть коэффициента связи между активностью данного радионуклида и скоростью счета импульсов в окне под пиком ^{137m}Ba . Интенсивность счета в каналах спектров приводили к имп/с на 1 Бк активности градуировочного образца. Используемые для последующего применения градуировочные спектры ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K были получены путем вычитания из аппаратурных спектров экспериментально определенного спектра фона.

Выполненные измерения позволили создать библиотеку спектров, необходимых для дальнейшего их применения при измерении проб почвы на данном детекторе. Полученные спектры адекватны спектрометрическим характеристикам конкретного детектора и фоновым характеристикам помещения, в котором расположен спектрометр (рис. 1).

Алгоритм обработки спектров проб почвы, полученных при измерении на данном детекторе, включает следующие шаги:

- выделение участка спектра, обусловленного только природными радионуклидами, содержащимися в пробе, и фоновой составляющей;
- подбор методом наименьших квадратов весовых коэффициентов к библиотечным спектрам ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K , при которых наблюдается минимальное расхождение между исходным спектром и суммарным спектром, полученным на основе расчета весовых коэффициентов;
- на основе полученных весовых коэффициентов производится теоретический расчет участков спектров ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K под пиком ^{137m}Ba и расчет площади пьедестала, формируемого фоном и природными радионуклидами.

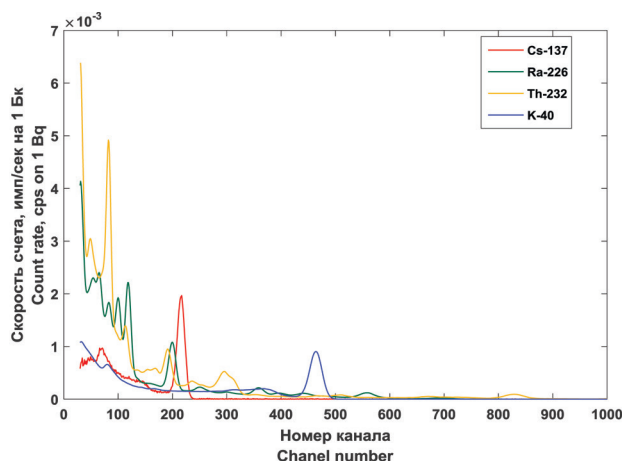


Рис. 1. Форма библиотечных спектров ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K , полученных на спектрометре с кристаллом NaI(Tl) 63×63 мм [Fig. 1. The shape of the library spectra of ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K with activity of 1 Bq measured on the spectrometer with a 63×63 mm NaI(Tl) crystal]

Расчет площади пика ^{137m}Ba и оценка активности и УА ^{137}Cs сводятся на заключительном этапе расчета к вычислению разницы площадей фактического и расчетного спектра.

Расчет весовых коэффициентов природных радионуклидов с минимизацией методом наименьших квадратов разности между расчетным суммарным спектром и фактическим спектром выполнялся средствами Matlab R2020 посредством функции «fminsearch».

Пояснения и графическая иллюстрация метода

Типичная форма спектра ^{137}Cs высокой интенсивности, в котором наличие природных радионуклидов в счетном образце не оказывает существенного влияния на площадь пика ^{137m}Ba (энергия гамма-квантов 661,6 кэВ), показана на рисунке 2. Как видно из рисунка 2, при вы-

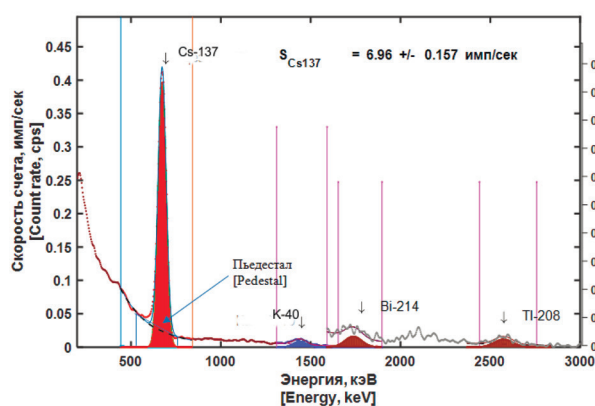


Рис. 2. Пример типичной формы спектра ^{137}Cs , полученного с детектором NaI(Tl), при котором форма пьедестала не оказывает существенного влияния на ошибку расчета площади пика ^{137}Cs . Шкала справа – скорость счета для пиков малой интенсивности [Fig. 2. An example of typical shape of the ^{137}Cs spectrum measured with the NaI(Tl) detector, in which the shape of the pedestal does not significantly affect the error in calculating the area of the ^{137}Cs peak. (The scale on the right is the count rate for low-intensity peaks)]

сокой интенсивности счета ^{137}Cs форма пьедестала (трапецеидальная или иной формы), вычитаемого при определении площади пика $^{137\text{m}}\text{Ba}$, мало влияет на величину данной площади.

При невысокой интенсивности счета ^{137}Cs в энергетическую область пика $^{137\text{m}}\text{Ba}$ попадают импульсы фонового излучения, импульсы комптоновского рассеяния от природных радионуклидов и пики полного поглощения ^{214}Bi и ^{208}Tl – дочерних радионуклидов ^{226}Ra и ^{232}Th (рис. 3). Площадь пьедестала при этом может быть сопоставима или даже больше площади пика $^{137\text{m}}\text{Ba}$. Упрощенное представление формы пьедестала в форме трапеции может привести к существенной ошибке расчета площади пика $^{137\text{m}}\text{Ba}$, поскольку истинная форма суммарного спектра от всех попадающих в данную энергетическую область рассеянных излучений и пиков полного поглощения, включая $^{137\text{m}}\text{Ba}$, сложнее (рис. 4). Расчет пьедестала в окне

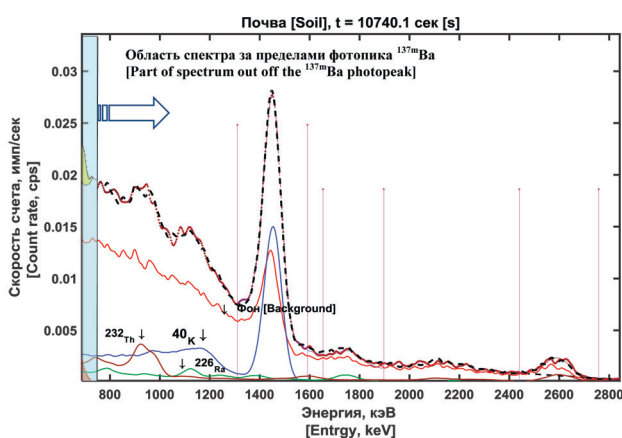


Рис. 3. Разложение измеренного спектра (пунктирная линия) на составные части с оценкой вкладов природных радионуклидов с использованием метода анализа всего спектра

[Fig. 3. Decomposition of the measured spectrum (dotted line) into its constituent parts with the assessment of the contributions of natural radionuclides using the whole spectrum analysis method]

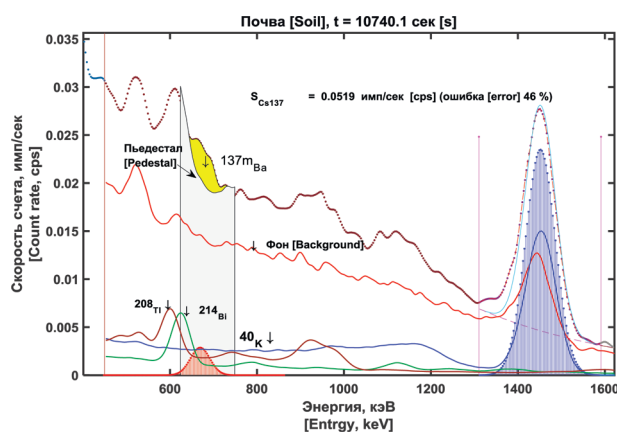


Рис. 4. Иллюстрация расчета площади пика $^{137\text{m}}\text{Ba}$ (желтая область) на основе оценки весовых коэффициентов вклада природных радионуклидов в суммарный спектр методом его декомпозиции и последующей оценки площади пьедестала

[Fig. 4. Illustration of the calculation of the $^{137\text{m}}\text{Ba}$ peak area (yellow area) based on assessment of the weight coefficients of natural radionuclides contribution to the total spectrum by the decomposition method and subsequent assessment of the pedestal area]

пика $^{137\text{m}}\text{Ba}$ на основе вкладов отдельных радионуклидов и фона в данную область требует точной оценки активности содержащихся в пробе природных радионуклидов. Поскольку оконный метод анализа сопряжен с большими ошибками определения площади фотопиков ^{226}Ra и ^{132}Th , связанными с их низкой интенсивностью и взаимным перекрестным вкладом, предлагаемый метод основан на анализе полного спектра за пределами фотопика $^{137\text{m}}\text{Ba}$. Данный подход позволяет включить в расчет существенно большее число импульсов, что приводит к уменьшению ошибки расчета активности природных радионуклидов и более точной оценке площади пьедестала под пиком $^{137\text{m}}\text{Ba}$.

Пример разложения спектра с использованием данного подхода показан на рисунке 3.

Полученные описанным выше способом весовые коэффициенты вклада природных радионуклидов в суммарный спектр позволяют рассчитать форму и площадь пьедестала под пиком $^{137\text{m}}\text{Ba}$, а также площадь фотопика $^{137\text{m}}\text{Ba}$ путем вычитания расчетного пьедестала из полного спектра (см. рис. 4).

Расчеты интенсивности счета радионуклидов и ошибок измерений

Взаимное наложение спектров ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K и ^{137}Cs ($^{137\text{m}}\text{Ba}$) приводит к необходимости учитывать весь набор неопределенностей оценки активности или УА отдельного радионуклида, поэтому от выбора положения (границ) окна, в пределах которого расположен пик $^{137\text{m}}\text{Ba}$, зависит степень влияния остальных радионуклидов. Для получения более выгодного соотношения между числом регистрируемых импульсов $^{137\text{m}}\text{Ba}$ и вкладом в суммарный счет остальных радионуклидов положение окна выбрано таким образом, чтобы правая ветвь фотопика $^{137\text{m}}\text{Ba}$ целиком попадала в данное окно, а левая граница окна выбрана так, чтобы фотопики высокой интенсивности ^{214}Bi (дочернего радионуклида ^{226}Ra) и ^{208}Tl (дочернего радионуклида ^{232}Th) вносили по возможности меньший вклад в суммарный счет в каналах, в которых находится левая ветвь $^{137\text{m}}\text{Ba}$, характеризующаяся невысокой интенсивностью счета (см. рис. 3). Опытным путем установлено, что оптимальным является окно, ограниченное каналами 200 и 240 (600–720 кэВ), при которых достигается выгодное соотношение интенсивностей и минимальная ошибка.

Как показано выше, интенсивность счета, а также активность и удельная активность ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th рассчитываются путем подбора оптимального сочетания весовых коэффициентов, с учетом фонового спектра получить минимальные различия между расчетным (на основе эталонных спектров) и измеренным спектром за пределами фотопика $^{137\text{m}}\text{Ba}$. Эти же коэффициенты могут быть применены и при расчете пьедестала в окне регистрации $^{137\text{m}}\text{Ba}$, то есть рассчитать число импульсов ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th , попадающих в данное окно:

$$\left. \begin{aligned} N_K &= K_K \cdot \sum_{200}^{240} \frac{SP_{K,Cs}}{t_{sp}} \\ N_{Ra} &= K_{Ra} \cdot \sum_{200}^{240} \frac{SP_{Ra,Cs}}{t_{sp}} \\ N_{Th} &= K_{Th} \cdot \sum_{200}^{240} \frac{SP_{Th,Cs}}{t_{sp}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $SP_{K,Cs}$, $SP_{Ra,Cs}$ и $SP_{Th,Cs}$ – эталонные спектры ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th в окне регистрации ^{137}Cs соответственно; K_K , K_{Ra} и K_{Th} – рассчитанные значения весовых коэффициентов для эталонных спектров ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th соответственно; N_K , N_{Ra} и N_{Th} – интенсивность счета ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th в окне ^{137}Cs ; t_{sp} – продолжительность измерений счетного образца. Интенсивность счета ^{137}Cs – N_{Cs} в окне может быть определена следующим образом:

$$N_{Cs} = \sum_{200}^{240} \frac{SP_{smp}}{t_{smp}} - \left(N_K + N_{Ra} + N_{Th} + \sum_{200}^{240} \frac{SP_{bkg}}{t_{bkg}} \right) = \quad (2)$$

$$N_{smp} - (N_K + N_{Ra} + N_{Th} + N_{bkg})$$

где SP_{smp} и SP_{bkg} – спектры счетного образца и фона соответственно; t_{smp} и t_{bkg} – время измерений счетного образца и фона соответственно.

Ошибка определения интенсивности счета ^{137}Cs для 95% доверительного интервала может быть рассчитана с помощью следующего соотношения:

$$Er_{Cs} = 2 \cdot \sqrt{\frac{\frac{N_{Cs}}{t_{smp}} + \frac{N_K}{t_{smp}} + \frac{N_{Ra}}{t_{smp}} + \frac{N_{Th}}{t_{smp}} + \frac{N_{bkg}}{t_{bkg}}}{N_{Cs}}} \quad (3)$$

Ошибки измерений и расчета интенсивности ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th зависят только от взаимного влияния данных радионуклидов и фона и рассчитываются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} Er_K &= 2 \cdot \sqrt{\frac{\frac{N_K}{t_{smp}} + \frac{N_{Ra}}{t_{smp}} + \frac{N_{Th}}{t_{smp}} + \frac{N_{bkg}}{t_{bkg}}}{N_K}}, \\ Er_{Ra} &= 2 \cdot \sqrt{\frac{\frac{N_K}{t_{smp}} + \frac{N_{Ra}}{t_{smp}} + \frac{N_{Th}}{t_{smp}} + \frac{N_{bkg}}{t_{bkg}}}{N_{Ra}}}, \\ Er_{Th} &= 2 \cdot \sqrt{\frac{\frac{N_K}{t_{smp}} + \frac{N_{Ra}}{t_{smp}} + \frac{N_{Th}}{t_{smp}} + \frac{N_{bkg}}{t_{bkg}}}{N_{Th}}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Верификация метода и алгоритма расчета

Для верификации предлагаемого метода оценки малых уровней активности в счетном образце выбрана проба почвы, в которой удельная активность по результатам измерений в геометрии «Маринелли» составляла 0,35 Бк/кг. Измерения проводились в течение 6 ч. Ошибка измерений составила 91,3%. Процедура верификации включала постепенную добавку к данной почве небольших навесок эталонной сыпучей смеси ^{137}Cs на основе кварцевого песка, позволяющих увеличить удельную активность почвы на 0,5 или 1 Бк/кг. Каждый раз после внесения добавочной активности проба почвы измерялась в течение 3 ч. Таким образом был получен ряд измерительных образцов почвы

с удельными активностями 0,35; 1, 35; 1, 85; 2,35; 2,85; 3,85; 4,85 и 5,85 Бк/кг. Результаты сопоставления уровней удельной активности в счетных образцах и результатов измерений и расчета удельной активности предлагаемым методом представлены на рисунке 5.

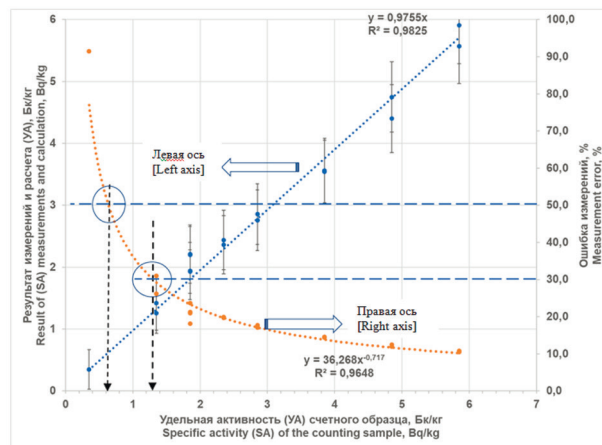


Рис. 5. Результаты сопоставления известных уровней удельной активности ^{137}Cs в счетных образцах (ось X) с результатами, полученными на основе измерений (ось Y). Ось слева – результат измерений удельной активности. Ось справа – погрешность измерений ($p=0,95$)

[Fig. 5.] Results of comparing the known specific activity of ^{137}Cs in counting samples (axis X) with the results obtained on the basis of measurements (axis Y). The axis to the left is the result of measurements and calculation of specific activity. The axis to the right is the measurement error ($p=0.95$)

Из рисунка 5 видно вполне удовлетворительное согласие между активностью счетных образцов и результатами измерений и расчета удельной активности предлагаемым методом ($R^2=0.98$). Из рисунка 5 также следует, что предлагаемый метод декомпозиции спектра позволяет измерять с ошибкой 50% удельную активность ^{137}Cs в почве с детектором NaI(Tl) с размером кристалла 63×63 мм в геометрии «Маринелли» объемом 1 л и времени измерений 6 ч на уровне 0,7 Бк/кг при доверительной вероятности 95%, а при значениях удельной активности 3 Бк/кг (минимально-детектируемая удельная активность большинства сходных по характеристикам спектрометров [3–6]) неопределенность измерений составляет 20%.

Следует отметить, что значение МДА ^{137}Cs получено в настоящем исследовании при значениях удельной активности ^{40}K – 200 Бк/кг; ^{226}Ra – 5 Бк/кг и ^{232}Th – 6 Бк/кг (формула 5).

$$MDA_{Cs} = 3.3 \cdot \sqrt{2 \cdot \left(\frac{N_K}{t_{smp}} + \frac{N_{Ra}}{t_{smp}} + \frac{N_{Th}}{t_{smp}} + \frac{N_{bkg}}{t_{bkg}} \right) \cdot KN_{Cs}} \quad (5)$$

Где $N_K=0,22$; $N_{Ra}=0,13$; $N_{Th}=0,14$; $N_{bkg}=0,57$ – скорость счета в окне цезия за счет ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th и фона соответственно, имп/с;

$T_{smp} = 21479$ – время измерений счетного образца, с;

$T_{bkg} = 85136$ – время измерений фонового образца, с;

$K_{NCS} = 27,72$ – эффективность регистрации ^{137}Cs в геометрии Маринелли, Бк на имп/с.

При более высоких значениях удельной активности природных радионуклидов МДА ^{137}Cs возрастает. Расчеты по формуле (5) показывают, что десятикратное увеличе-

ние удельной активности отдельных радионуклидов повышает МДА в 1,7–2 раза, а 10-кратное увеличение УА всех природных радионуклидов повышает МДА в 2,8 раза.

Заключение

Разработан метод и алгоритм обработки спектра, полученного на сцинтилляционном спектрометре с кристаллом NaI(Tl), позволяющий измерять активность ^{137}Cs в пробах почвы (с содержанием ^{40}K менее 200 Бк/кг, ^{226}Ra и ^{232}Th – менее 10 Бк/кг) в геометрии Маринелли объемом 1 л на уровне 0,7 Бк/кг с неопределенностью не более 50% в 95% доверительном интервале. Метод основан на создании библиотеки градуировочных образцов ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K , а также спектра фона и на моделировании на их основе расчетного спектра, близкого к измеренному спектру в диапазоне энергий за пределами пика $^{137\text{m}}\text{Ba}$. Процесс создания модельного спектра включает расчет весовых коэффициентов вклада природных радионуклидов в суммарный спектр, полученный на основе измерений, и их использование для расчета формы и площади модельного спектра под пиком $^{137\text{m}}\text{Ba}$. Тем самым повышается точность определения площади пика $^{137\text{m}}\text{Ba}$ и снижение минимально-детектируемой активности при измерении проб ^{137}Cs в присутствии природных радионуклидов. При десятикратном увеличении удельной активности природных радионуклидов МДА ^{137}Cs возрастает до 1,98 Бк/кг.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Репин В.С. разработал алгоритм и программу обработки спектра.

Седнев К.А. провел градуировку спектрометра, участвовал в создании библиотеки градуировочных спектров и выполнил верификационные измерения.

Благодарности

Авторы благодарны К.В. Варфоломеевой (Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева) за помощь при оформлении списка литературы.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнялась в рамках НИР по Отраслевой научно-исследовательской программе Роспотребнадзора на 2021–2025 гг. «Научное обоснование национальной системы обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия, управления рисками здоровью и повышения качества жизни населения России» Направление 7. Научное обеспечение радиационной безопасности населения России в целях минимизации рисков здоровью Раздел 7.2. Научное обоснование системы радиационной безопасности Российской Федерации.

Литература

- Храмцов Е.В., Репин В.С., Библин А.М. и др. Радиационно-гигиеническая характеристика охраняемых зон мирных ядерных взрывов в Архангельской области // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 1. С. 111–123. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-1-111-123>.
- Рамзаев В.П., Медведев А.Ю., Репин В.С., и др. Радиационно-гигиенический мониторинг в местах применения ядерно-взрывных технологий в мирных целях и расчет доз облучения критических групп населения // Радиационная гигиена. 2010. Т. 3, № 1. С. 33–39.
- Официальный сайт НПП Доза. Характеристика прибора «Прогресс-гамма»: описание. URL: <https://www.doza.ru/catalog/spectrometers/3/> (Дата обращения 30.08.2022).
- Официальный сайт НТЦ Радэк. Характеристика прибора МКГБ-01: описание. URL: <https://www.radek.ru/product/Spektrometry---radiometry-gamma---beta--i-alfazlucheniya/23/> (Дата обращения 30.08.2022).
- Официальный сайт НТЦ Амплитуда. Характеристика прибора МУЛЬТИРАД-гамма»: описание. URL: <https://amplituda.ru/catalog/radiatsionnyy-kontrol/oborudovanie-radiatsionnogo-kontrolya-2/spektrometry-i-radiometry/>. (Дата обращения 30.08.2022).
- Обзор отечественных радиометрических и спектрометрических систем, которые могут быть использованы для целей учета и контроля ядерных материалов. URL: <http://vniia.ru/rgamo/literat/obzor/doc/obzorrus.pdf> (Дата обращения 10.09.2022).
- He J-F, Yang Y-Z., Qu J-H., et al. An inversion decomposition method for better energy resolution of NaI (Tl) scintillation detectors based on a Gaussian response matrix // Journal of Nuclear Science and Technology. 2016. Vol. 27. P. 2–10.
- Alizadeh D., Ashrafi S. New hybrid metaheuristic algorithm for scintillator gamma ray spectrum analysis // Nuclear instruments and methods in physics research. Section A: Accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment. 2019. Vol. A 915. P. 1–9.
- Арефьева Д.В., Фирсанов В.Б., Куруч Д.Д., и др. Градуировка сцинтилляционного спектрометра гамма-излучений с применением метода математического моделирования // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 4. С. 93–100. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-93-100.
- Hendriks P.H.G.M., Limburg J., de Meijer R.J. full-spectrum analysis of natural g-ray spectra // Journal of Environmental Radioactivity. 2001. Vol. 53. P. 365–380.
- Alamaniotis M., Jevremovic T. Hybrid fuzzy-genetic approach integrating peak identification and spectrum fitting for complex gamma-ray spectra analysis // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2015;62(3): 1262–1277. DOI:10.1109/tns.2015.2432098.
- Burr T, Hamada M. Radio-isotope identification algorithms for NaI γ spectra // Algorithms. 2009;2: 339–360. DOI: 10.3390/a201033.
- Liu B., Yang H., Lv H., et al. A deconvolution method for scintillator gamma-ray spectrum analysis based on convex optimization // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2020;A(957): 1–6.
- Shahabinejad H., Vosoughi N. SGSD: A novel sequential gamma-ray spectrum deconvolution algorithm // Annals of Nuclear Energy. 2019;132: 369–380.
- Дровников В.В., Егоров М.В. и др. Программа «Na Spectra Analysis System» – SAS Na M3 для обработки сложных NaI сцинтилляционных спектров. Доклад на XVII международном семинаре «Спектрометрический анализ. Аппаратура и обработка данных на ПЭВМ». 15 – 19 ноября 2010 г. ФГОУ «ГЦИПК» г. Обнинск. URL: http://www.radiation.ru/publications/SAS_Na_M3_software_for_complex_NaI_gammaspectra.pdf (Дата обращения: 11.07.2022).
- Седнев К.А., Некрасов В.А., Репин В.С. Универсальная градуировка сцинтилляционного спектрометра с детектором NaI(Tl) при измерении активности ^{137}Cs в счетных образцах произвольной плотности и объема // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 4. С. 96–102. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-96-102.

Поступила: 15.10.2022 г.

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

Седнев Константин Андреевич – исполняющий обязанности младшего научного сотрудника 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

Для цитирования: Репин В.С., Седнев К.А. Метод обработки спектра при измерении детектором NaI(Tl) малых уровней удельной активности ^{137}Cs в присутствии природных радионуклидов // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 142-148. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-142-148

Spectrum processing method for measuring low levels of specific activity of ^{137}Cs with a NaI(Tl) detector in the presence of natural radionuclides

Viktor S. Repin, Konstantin A. Sednev

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

When measuring low levels of ^{137}Cs in soil samples using spectrometers with a NaI(Tl) detector, identification of the $^{137\text{m}}\text{Ba}$ peak (the 662 keV gamma line of the daughter radionuclide) is difficult due to the influence of natural radionuclides, the peaks of which fall within the $^{137\text{m}}\text{Ba}$ detection region. To identify and estimate the area under the peak of $^{137\text{m}}\text{Ba}$, it is necessary to know the contribution of the background component to this area and the contribution of each natural radionuclide. When using such approach, the accuracy of estimating the $^{137\text{m}}\text{Ba}$ photopeak area depends on the accuracy with which the levels of natural radionuclides are determined. The article proposes a method of spectrum decomposition based on the taking into account individual parameters of the spectrometer and a more accurate determination of specific activities of natural radionuclides. The method involves the modeling the spectral regions for each natural radionuclide in the area of $^{137\text{m}}\text{Ba}$ peak and subtracting the simulated regions and the background spectrum from the total spectrum under the peak of $^{137\text{m}}\text{Ba}$. The use of this approach allows to measure with a 63×63 NaI(Tl) detector the specific activity of ^{137}Cs at a level of 0.7–1 Bq/kg with an uncertainty of 30–50% in the Marinelly geometry with a volume of 1 liter and with the measurement time of 6 hours.

Key words: gamma spectrometry, spectrum decomposition, cesium-137, natural radionuclides, spectrometer calibration.

Personal contribution of authors

Repin V.S. developed the algorithm and spectra processing program.

Sednev K.A. calibrated the spectrometer, participated in the development of calibration spectra library and performed verification measurements.

Acknowledgements

Authors would like to thank K.V. Varfolomeeva (St-Petersburg Institute of Radiation Hygiene) for the help with the list of references.

Conflict of interests

Authors declare no conflict of interest.

Victor S. Repin

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

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

Sources of finance

The study was performed within the framework of Rospotrebnadzor scientific-research program for 2021-2025 “Scientific justification of the national system of provision of sanitary-epidemiologic well-being, health risk management and Russian population quality of life improvement”, Direction 7. Scientific Justification of Russian population to minimize health risks. Part 7.2. Scientific justification of radiation safety system in the Russian Federation.

References

1. Khramtsov EV, Repin VS, Biblin AM, Varfolomeeva KV, Ivanov SA. Radiation-hygienic characteristic of the protected zones of peaceful nuclear explosions in the Arkhangelsk region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(1):111-123. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-1-111-123>.
2. Ramzaev VP, Medvedev AYu, Repin VS, Timofeeva MA, Khramtsov EV. Radiation monitoring the industrial nuclear explosion sites and evaluation of the doses to critical groups of population. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2010;3(1):33-39. (In Russian)
3. Official site of SPE “Doza”. Characteristics of the device “Progress-gamma”: description. URL: <https://www.doza.ru/catalog/spectrometers/3/>. (Accessed 30 August 2022) (In Russian).
4. Official site of STC «RADEK». Characteristics of the MKGB-01 device: description URL: <https://www.radek.ru/product/Spektrometry---radiometry-gamma---beta--i-alfa-izlucheniya/23/>. (Accessed 30 August 2022) (In Russian).
5. Official site of STC «AMPLITUDA». Characteristics of the MULTIRAD-gamma device: description. URL: <https://amplituda.ru/catalog/radiatsionnyy-kontrol/oborudovanie-radiatsionnogo-kontrolya-2/spektrometry-i-radiometry/>. (Accessed 30 August 2022). (In Russian).
6. Review of domestic radiometric and spectrometric systems that can be used for accounting and control of nuclear materials URL: <http://vniia.ru/rgamo/literat/obzor/doc/obzorrus.pdf> (Accessed 09 October 2022). (In Russian).
7. He J-F, Yang Y-Z, Qu J-H, et al. An inversion decomposition method for better energy resolution of NaI (TI) scintillation detectors based on a Gaussian response matrix. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2016;27: 2-10.
8. Alizadeh D, Ashrafi S. New hybrid metaheuristic algorithm for scintillator gamma ray spectrum analysis. *Nuclear instruments and methods in physics research. Section A: Accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment*. 2019;A(915): 1–9.
9. Arefeva DV, Firsanov VB, Kuruch DD, Bryukhov RE, Tarita VA. Graduation of the scintillation spectrometer of gamma radiation using the method of mathematical modeling. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(4): 93-100. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-93-100 (In Russian).
10. Hendriks PHGM, Limburg J, de Meijer RJ. Full-spectrum analysis of natural g-ray spectra. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2001;53: 365–380.
11. Alamaniotis M, Jevremovic T. Hybrid fuzzy-genetic approach integrating peak identification and spectrum fitting for complex gamma-ray spectra analysis. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2015;62(3): 1262–1277. DOI:10.1109/tns.2015.2432098.
12. Burr T, Hamada M. Radio-isotope identification algorithms for NaI spectra. *Algorithms*. 2009;2: 339-360. DOI: 10.3390/a201033.
13. Liu B, Yang H, Lv H, et al. A deconvolution method for scintillator gamma-ray spectrum analysis based on convex optimization. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 2020;A(957): 1-6.
14. Shahabinejad H, Vosoughi N. SGSD: A novel sequential gamma-ray spectrum deconvolution algorithm. *Annals of Nuclear Energy*. 2019;132: 369–380.
15. Drovnikov VV, Egorov MV, et al. Na Spectra Analysis System – SAS Na M3 for processing complex NaI scintillation spectra. Report at the XVII International Seminar “Spectrometric Analysis. Equipment and data processing on a PC. November 15 – 19, 2010 FGOU “GCIPIK” Obninsk. URL: http://www.radiation.ru/publications/SAS_Na_M3_software_for_complex_NaI_gammaspectra.pdf (Accessed 07 November 2022). (In Russian).
16. Sednev KA, Nekrasov VA, Repin VS. Universal calibration of a scintillation spectrometer with a NaI(Tl) detector when measuring ¹³⁷Cs activity in counting samples of arbitrary density and volume. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(4): 96-102. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-96-102 (In Russian).

Received: 15 October, 2022

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

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

For citation: Repin V.S., Sednev K.A. Spectrum processing method for measuring low levels of specific activity of ¹³⁷Cs with a NaI(Tl) detector in the presence of natural radionuclides. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 4, P. 142-148. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-142-148

Radiation situation at the “Pirit” peaceful underground nuclear explosion site

Artem M. Biblin¹, Evgeniy V. Khrantsov¹, Viktor S. Repin¹, Sergey A. Ivanov¹, Kseniya V. Varfolomeeva¹, Konstantin A. Sednev¹, Yuliya M. Bogomolova²

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 Federal State Budgetary Institution “Nenetsky State Nature Reserve”, Iskateley, Russia

The aim of this study was to evaluate radiation situation at the “Pirit” peaceful underground nuclear explosion site. The peaceful underground nuclear explosion “Pirit” with the capacity of 37.6 kt of TNT equivalent was carried out on May 25, 1981 on the territory of the Kumzhinskoye gas condensate field at a depth of 1.5 km. The field is located near the northern coast of the European part of Russia in the delta of the Pechora River (Nenets Autonomous District). The peaceful underground nuclear explosion “Pirit” was carried out with the aim to stop the uncontrolled gas gushing. Radiation situation is assessed according to the main indicators: dose rate values and content of technogenic radionuclides in soil and water. The radiation survey included determining geographic coordinates of specific landscape elements, measurement and sampling points using satellite navigators, measurement of ambient dose equivalent rate, identification of gamma-emitting radionuclides in situ by field gamma spectrometry, sampling of water, photo and video shooting. On the site of the underground nuclear explosion “Pirit” the values of the ambient dose equivalent rate were in the range of 0.050–0.089 $\mu\text{Sv/h}$, which corresponds to the levels of the natural radiation background. No sites of local radioactive contamination of soil by ^{137}Cs were detected. The tritium content (less than 5 Bq/kg) in water bodies does not exceed the levels of fluctuations of this indicator in other regions of the European territory of Russia. The estimated value of the effective dose due to ingestion of tritium in drinking water in local settlements was 0.044 $\mu\text{Sv/year}$. The radiation situation on the territory of the peaceful nuclear explosion “Pirit” meets the requirements of the Russian Sanitary Regulations and Standards 2.6.1.2819–10 “Ensuring the radiation safety of the population living in the regions of nuclear explosions for peaceful purposes (1965–1988)” and currently does not pose a threat to public health. Due to the potential danger of technogenic radionuclides coming from the epicenter of the explosion to the surface for long-term radiation safety, it is necessary to organize radiation monitoring of the territory adjacent to the explosion site, determine the boundaries of the protected zone and set appropriate information signs warning of radiation danger.

Key words: peaceful nuclear explosion, underground nuclear explosion, tritium, radioactive contamination, radiation safety, Nenetsky State Nature Reserve, Pirit.

Радиационная обстановка в районе проведения мирного ядерного взрыва «Пирит»

А.М. Библин¹, Е.В. Храпцов¹, В.С. Репин¹, С.А. Иванов¹, К.В. Варфоломеева¹, К.А. Седнев¹, Ю.М. Богомолова²

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 Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный природный заповедник «Ненецкий», п. Искателей, Россия

Целью исследования являлась оценка состояния радиационной обстановки в районе проведения мирного ядерного взрыва «Пирит» и разработка предложений по долговременному обеспечению ра-

Artem M. Biblin

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

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

Библин Артём Михайлович

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

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

радиационной безопасности. Мирный ядерный взрыв «Пирит» мощностью 37,6 кт на глубине 1,5 км был произведен 25 мая 1981 г. на Кумжинском газоконденсатном месторождении в дельте реки Печора (Ненецкий автономный округ) с целью остановки аварийного фонтанирования газа. Дана оценка радиационной обстановки по основным показателям: значения мощности дозы, содержание техногенных радионуклидов в почве и воде. Радиационное обследование района проведения мирного ядерного взрыва «Пирит» включало в себя определение географических координат специфических элементов ландшафта, точек измерений и отбора проб с использованием спутниковых навигаторов, измерение мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения, идентификацию гамма-излучающих радионуклидов *in situ* методом полевой гамма-спектрометрии, отбор проб воды на содержание трития, фото- и видеосъемку. В районе проведения мирного ядерного взрыва «Пирит» значения мощности амбиентного эквивалента дозы находятся в диапазоне 0,050–0,089 мкЗв/ч, что соответствует уровням естественного радиационного фона. Участки локального радиоактивного загрязнения почвы ^{137}Cs не обнаружены. Содержание трития (менее 5 Бк/кг) в водных объектах не превышает уровней колебаний данного показателя в других регионах европейской территории России. Консервативная оценка дозы дополнительного техногенного облучения отдельных лиц из населения от поступления трития с питьевой водой составила 0,044 мкЗв/год. Радиационная обстановка на территории мирного ядерного взрыва «Пирит» соответствует требованиям СанПиН 2.6.1.2819–10 «Обеспечение радиационной безопасности населения, проживающего в районах проведения (1965–1988 гг.) ядерных взрывов в мирных целях» и в настоящее время не представляет угрозы здоровью населения. В связи с потенциальной опасностью выхода техногенных радионуклидов из эпицентра взрыва на поверхность для долговременного обеспечения радиационной безопасности необходимы организация радиационного мониторинга территории, прилегающей к месту проведения взрыва, определение границ охранной зоны и установка соответствующих информационных знаков, предупреждающих о радиационной опасности.

Ключевые слова: мирный ядерный взрыв, подземный ядерный взрыв, тритий, радиоактивное загрязнение, радиационная безопасность, заповедник «Ненецкий», Пирит.

Introduction

Peaceful underground nuclear explosion (PNE) “Pirit” is one of five explosions conducted to eliminate emergency gas fountains within the State program “Nuclear Explosions for the National Economy” in the USSR and the only one in the territory of the Russian Federation [1]

Uncontrolled gas gushing from well No. 9 into the environment began on November 6, 1980 during the development of the Kumzhinskoye gas condensate field. This field is located near the northern coast of the European part of Russia in the delta of the Pechora River (Nenets Autonomous District). Hydrocarbon release exceeded 800 thousand cubic meters per day. To stop the discharge PNE “Pirit” with the capacity of 37.6 kt of TNT equivalent was conducted on May 25, 1981 at a depth of 1.5 km. However, due to technical miscalculations, the emergency did not eliminate, the hydrocarbon yield increased to 1700 thousand cubic meters per day. In 1987, well No. 9 was shut in by drilling inclined wells [1-5]. The emergency at the field caused pollution of the environment with liquid hydrocarbons.

To reduce the anthropogenic load on the territory and to stop hydrocarbons inflow to Korovinskaya and Pechorskaya bays, Maly Guset Pechora’s arm was dammed upstream and downstream to the emergency area and along its entire perimeter (595x310 m). Channel was separated by a sand and gravel mixture dam, which height varies from 1 to 6 m. The area of the territory limited by the dam along the outer contour is 120 thousand m^2 . The area of enclosed ponds over large and small craters is about 77400 m^2 . Inflow of hydrocarbons from craters to the territory bounded by the dam continues at present [3-5].

In 2008 and 2011, surveys conducted by VNIIPromtehnologii commissioned by joint-stock company “SN Invest” showed no changes in the radiation situation in the PNE “Pirit” area [3]. According to the results of the works

Введение

Мирный ядерный взрыв (МЯВ) «Пирит» стал одним из пяти взрывов, произведенных с целью ликвидации аварийных фонтанов за период реализации государственной программы «Ядерные взрывы для народного хозяйства», в СССР и единственным на территории Российской Федерации [1].

При разработке Кумжинского газоконденсатного месторождения, расположенного вблизи северного побережья европейской части РФ в дельте реки Печора (Ненецкий автономный округ), 6 ноября 1980 г. началось неуправляемое фонтанирование газа из скважины № 9 в окружающую среду. Выброс углеводородов составлял более 800 тыс. м^3 в сутки. Для остановки фонтанирующего газа 25 мая 1981 г. был проведен МЯВ «Пирит» мощностью 37,6 кт (по тротиловому эквиваленту) на глубине 1,5 км. Однако в связи с техническими просчетами аварийную ситуацию не удалось ликвидировать, произошло усиление выхода углеводородов до 1700 тыс. м^3 в сутки. В 1987 г. скважина № 9 была перекрыта путем бурения наклонных скважин [1–5]. Аварийная ситуация на месторождении вызвала загрязнение окружающей среды жидкими углеводородами.

Для снижения антропогенной нагрузки на территорию и прекращения поступления углеводородов в Коровинскую и Печорскую губы протока Малый Гусинец была перекрыта двумя плотинами, расположенными выше и ниже по течению относительно аварийной площади и по всему ее периметру (595x310 м), и отделена дамбой из песчано-гравийной смеси, высота которой меняется от 1 до 6 м. Площадь территории, ограниченной дамбой по внешнему контуру, составляет 120 тыс. м^2 , а площадь замкнутых водоемов над большими и малым кратерами – около 77,4 тыс. м^2 . Поступление углеводородов из кратеров на территорию, ограниченную дамбой, в настоящее время продолжается [3–5].

performed in 2020 by the researchers of the N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, no human-made radionuclides were detected in the surface layer of bottom sediments and in the aquatic environment [6-8].

At present, the PNE "Pirit" area is located on the territory of the Nenetsky State Nature Reserve [4, 9-11].

In accordance with the Federal Law of July 11, 2011 "Handling Radioactive Waste and on Amending Certain Legislative Acts of the Russian Federation" and the Decree of the Government of the Russian Federation of October 19, 2012 N 1069 "On criteria of assignment for solid, liquid and gas wastes to radioactive wastes, criteria of assignment of radioactive wastes to special radioactive wastes and to disposable radioactive wastes and criteria of disposable radioactive wastes classification", PNE are classified as special (permanent) radioactive waste.

Taking into account the potential danger of the release of technogenic radionuclides from the central zone of a nuclear explosion to the surface, a radiation survey of the PNE "Pirit" nuclear test site was conducted in July 2021 in accordance with the plan of field works by the Contract No. 81.001.20.2 with the Federal Medical and Biological Agency of Russia.

The aim of this study was to evaluate the radiation situation in the area of the PNE "Pirit".

Materials and methods

At the emergency site there is an artificial reservoir, separated by a dam and surrounded by an embankment barrier system around it (Fig. 1). The drilling rig was disposed in the course of the territory rehabilitation works. A characteristic feature of the artificial reservoir in the area adjacent to the explosion site is its contamination with

По результатам исследований ВНИПИПром-технологии, выполненных по заказу АО «СН Инвест» в 2008 и 2011 гг., не выявлено негативных последствий МЯВ «Пирит» на радиационную обстановку в районе его проведения [3]. По результатам работ, выполненных в 2020 г. сотрудниками Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова УрО РАН (г. Архангельск), также не обнаружено техногенных радионуклидов в поверхностном слое донных отложений и в водной среде [6-8].

В настоящее время район проведения МЯВ «Пирит» находится на территории ФГБУ «Государственный заповедник «Ненецкий» [4, 9-11].

В соответствии с изменениями, внесенными в Федеральный закон от 11 июля 2011 г. «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», и Постановлением Правительства РФ от 19 октября 2012 г. № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов», МЯВ отнесены к особым (не удаляемым) радиоактивным отходам.

Учитывая наличие потенциальной опасности выхода техногенных радионуклидов из центральной зоны ядерного взрыва на поверхность, в июле 2021 г. в соответствии с планом экспедиционных работ в рамках выполнения государственного контракта № 81.011.20.2 от 20 мая 2020 г. «Разработка и научное обоснование радиационно-гигиенических требований к охраняемым зонам мирных ядерных взрывов при переводе их в стадию консервации» с ФМБА



Рис. 1. Расположение места проведения мирного ядерного взрыва «Пирит» в Ненецком автономном округе России [Fig. 1. Location the "Pirit" peaceful underground nuclear explosion site in the Nenets Autonomous District, Russia]

of ambient dose equivalent rate, identification of gamma-emitting radionuclides *in situ* by field gamma spectrometry, sampling of water, photo and video shooting (Fig. 1–3).

H*(10) was measured at a height of 1 m from the soil surface using a DKS-AT1121 (ATOMTEX, Belarus). Ambient dose equivalent rate measurement range for DKS-AT1121 is in range from 5×10^{-2} to 1×10^7 $\mu\text{Sv/h}$. The measurements were made at a height of 1 m from the soil surface. Location of ambient dose equivalent rate of the gamma radiation measurement points on the territory of the PNE "Pirit" presented in Figure 3. During the field research 208 H*(10) measurements were made in the surveyed territory. Among them three were made in the settlements Naryan-Mar and Iskately and two on the Pechora River at tritium sampling points.

Gamma-emitting radionuclides were identified using MKG-AT1321 (ATOMTEX, Belarus) with NaI(Tl) scintillation detector $\varnothing 25 \times 40$ mm energy dependence relative to 662 keV (^{137}Cs) NaI(Tl) energy $\pm 20\%$ (in the energy range from 50 keV to 3 MeV). The measurements were made at a height of 1 m from the soil surface. The counting time was 1 hour. The points of 11 gamma spectrometric measurements are shown in Figure 4.

Soil sampling and laboratory measurements of the specific activity of radionuclides in the soil were not made, since the PNE "Pirit" site was covered with a layer of rubble.

In the area adjacent to the explosion site, 21 water samples were taken from surface water bodies for laboratory testing for tritium content (Fig. 5). Also 5 water samples were taken to determine the tritium content in the settlements and rivers of the PNE "Pirit" area. Sampling and determination of the specific activity of tritium in water in counting samples were carried out on a liquid alpha-beta spectrometer "Quantulus-1220" ("PerkinElmer", USA) according to the

35) и 4 скважины специального назначения (№№ 25, 26, 27 и 27-бис), пробуренные для ликвидации аварии на скважине К-9 (см. рис. 2) [3].

Разведочная скважина К-9 находится в устье, расположенном на возвышенности левого берега протоки Малый Гусинец (рукав Печоры), на удалении 3 км от Коровинской губы. Рядом с ней с одной стороны располагаются поисковая скважина К-5 и разведочная скважина К-10 (удалены от К-9 на 50 и 150 м соответственно) и с другой, на расстоянии 180 м от К-9 – структурно-поисковая скважина К-134. Скважина специального назначения, пробуренная для остановки фонтана газоконденсата и гашения газового факела, К-25 (МЯВ «Пирит», глубиной 1510–1530 м), располагается в 600 м к северо-западу от устья скважины К-9. Скважина К-26 (глубиной 1300 м), предназначенная для проникновения в зону атомного взрыва, располагается на расстоянии 843 м от скважины К-9. Скважина К-27 (глубиной 2382 м) предназначена для установления гидродинамической связи с зоной перфорации ствола скважины К-9 и удалена от неё на 1060 м [3]. Устье скважины К-27-БИС (глубиной около 1000 м), предназначенной для обнаружения ствола К-9 на относительно небольшой глубине, расположено на расстоянии 451 м от К-9 (см. рис. 2).

Радиационное обследование района проведения МЯВ «Пирит» проводилось по традиционной схеме [12, 13], которая включала в себя определение географических координат специфических элементов ландшафта, точек измерений и отбор проб с использованием спутниковых навигаторов, измерение мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (МАЭД), идентификацию гамма-излучающих радионуклидов *in situ* методом полевой гамма-спектрометрии, отбор проб воды на содержание трития, фото- и видео-съемку (рис. 3–5).

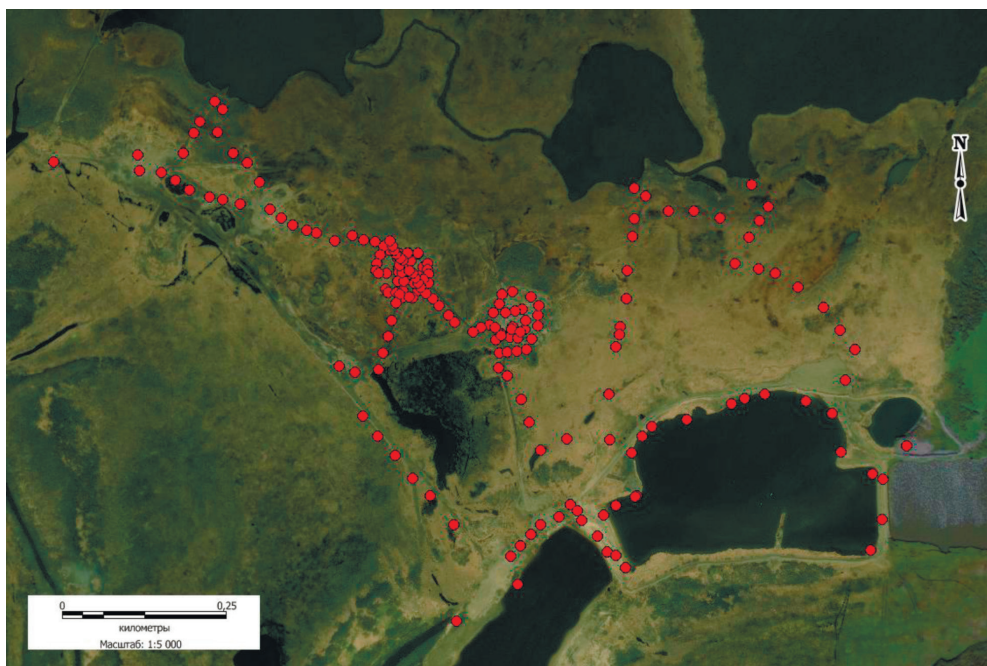


Рис. 3. Точки измерений МАЭД на территории, прилегающей к месту проведения МЯВ «Пирит»
[Fig.3. Locations of ambient dose equivalent rate measurement points (arrow) on the territory of the PNE "Pirit"]

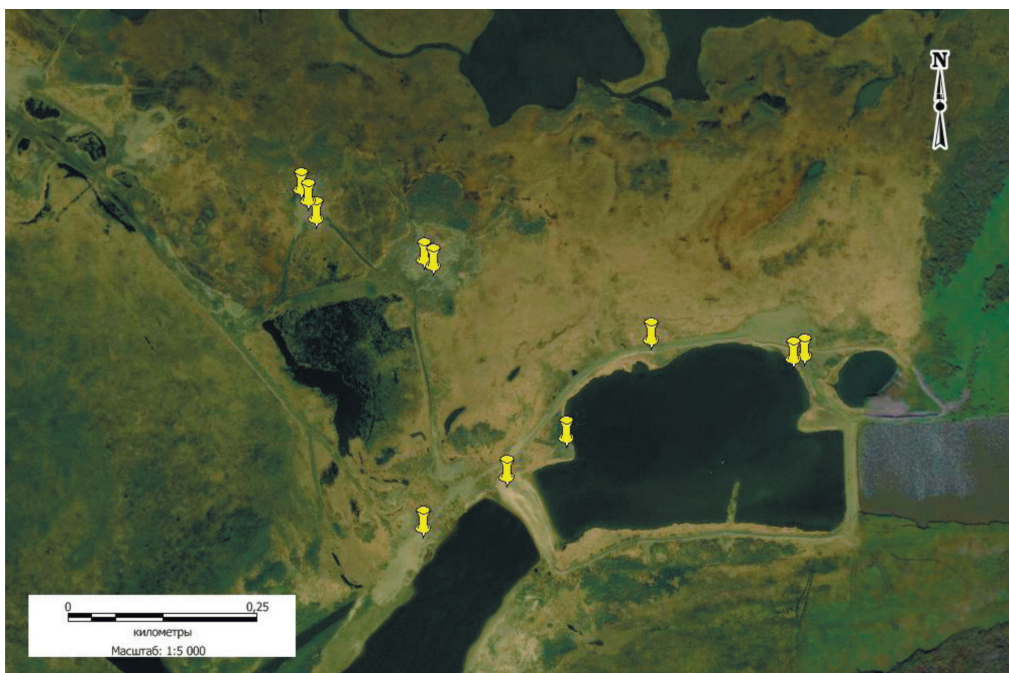


Рис. 4. Точки проведения гамма-спектрометрических исследований
 [Fig. 4. Sites of gamma spectrometric measurements (pin) on the territory of the PNE "Pirit"]

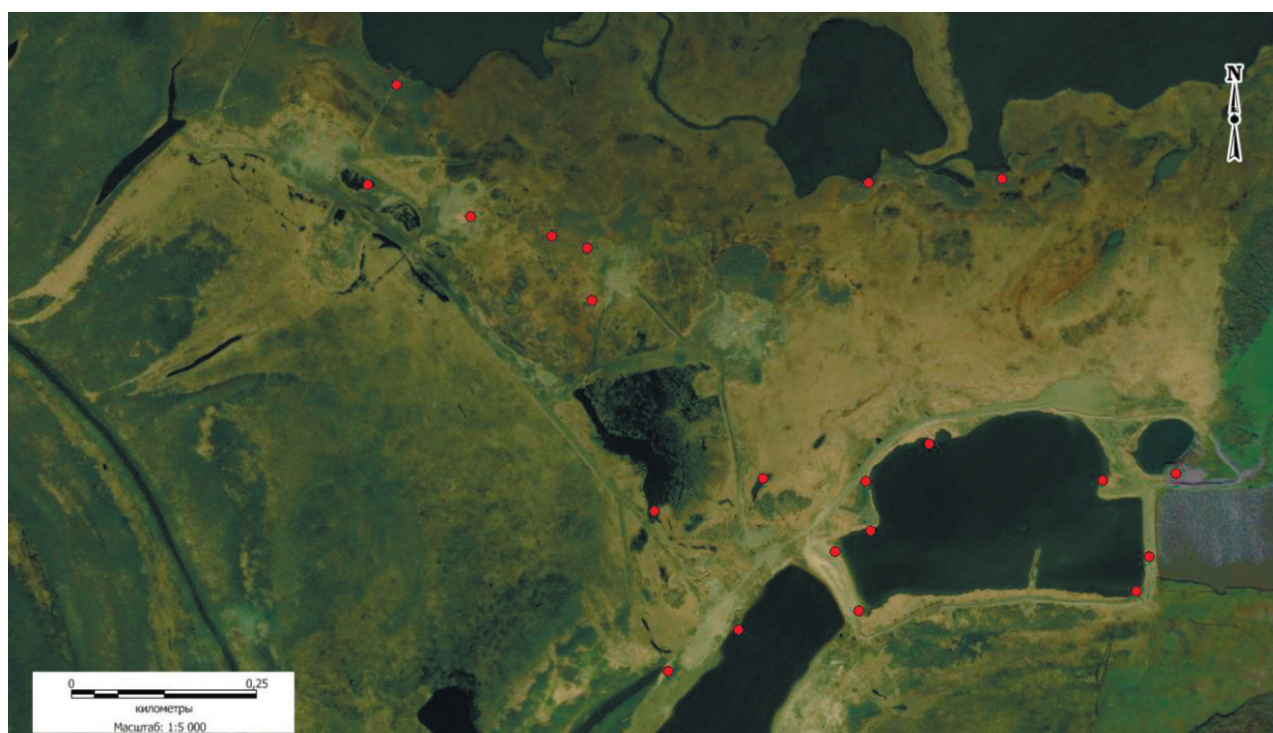


Рис. 5. Точки отбора проб воды из поверхностных водоемов на содержание трития на территории, прилегающей к месту проведения МЯВ «Пирит»

[Fig. 5. Location of sampling points (circles) for determination of tritium activity concentration in water at the region of the PNE "Pirit"]

method described in the article by Ramzaev V.P. et al. [14]. At duration of measurements of 360 minutes the minimum detectable activity was equal to 2 Bq/L. Taking into account that in the current Russian Norms of radiation safety. SanPiN 2.6.1.2523-09 NRB-99/2009 (hereinafter NRB-99/2009) the intervention level for drinking water is dimensioned in Bq/kg

Измерение МАЭД выполнялось на высоте 1 м от поверхности почвы с помощью ДКС-АТ1121 (АТОМТЕХ, Беларусь) с диапазоном измерений непрерывного рентгеновского и гамма-излучения от 5×10^{-2} до 1×10^7 мкЗв/ч и пределом допускаемой дополнительной относительной погрешности $\pm 10\%$ при изменении температуры воздуха

(specific activity), the results obtained are also given in this dimension. The density of water at 20 °C was taken as 1.00 g/cm³ (rounded from 0.9982 g/cm³) [15].

Visualization of the measurement and sampling points as well as of the fixed landscape features in the investigated territory was performed using the geoinformation system MapInfo 7.8.

The internal exposure dose of a representative individual due to the intake of ³H with drinking water in the settlement (E_{water_settl}) was calculated by the formula:

$$E_{water_settl} = m_{water} \cdot A_i^{H3} \cdot \epsilon_{H3}$$

where:

A_i^{H3} – the maximum specific activity of ³H in the water from i drinking water sources in the settlement; ϵ_{H3} – dose coefficient for ³H entering the body of an adult with drinking water, which in accordance with NRB-99/2009 (see Annex 2a to NRB-99/2009) is $1.8 \cdot 10^{-5}$ μSv/Bq; m_{water} – annual water consumption is assumed to be 730 kg.

Results and discussion

Visual inspection of the PNE “Pirit” site showed a significant improvement in the sanitary condition compared to the data presented in the literature [3]. Currently, the area surrounding the accident-free wells (special purpose wells) has been reclaimed, the areas around the wells are backfilled with gravel mixture. However, there are some dismantled wooden structures and parts of metal structures in the area around the special purpose wells (Figures 2 and 6).

от –30 °C до +50 °C (относительно нормальных условий). Точки измерений МАЭД на территории, прилегающей к месту проведения МЯВ «Пирит», представлены на рисунке 3. Всего на обследованной территории было проведено 208 измерений МАЭД, из которых 3 выполнено в населенных пунктах (Нарьян-Мар и пос. Искателей) и 2 – на реке Печора в точках отбора проб воды.

Идентификация гамма-излучающих радионуклидов проводилась с помощью МКГ-АТ1321 (АТОМТЕХ, Беларусь) с сцинтилляционным детектором NaI(Tl) Ø25×40 мм; энергетическая зависимость относительно энергии 662 кэВ (¹³⁷Cs) NaI(Tl) ±20% (в диапазоне энергий от 50 кэВ до 3 МэВ). Измерения выполнялись на высоте 1 м от поверхности почвы, время экспозиции – 1 ч. Точки проведения 11 гамма-спектрометрических измерений представлены на рисунке 4.

Отбор проб почвы и лабораторные измерения удельной активности радионуклидов в почве не проводились, поскольку площадка объекта была отсыпана слоем щебня.

Для лабораторного исследования содержания трития в воде были отобраны 21 проба воды из поверхностных водоемов, расположенных непосредственно на территории, прилегающей к месту проведения взрыва, и 5 проб из источников питьевого водоснабжения населенных пунктов и рек района (рис. 5). Обор проб и определение удельной активности трития в воде в счетных образцах выполнены на жидкостном альфа-бета-спектрометре «Quantulus-1220» фирмы «PerkinElmer» (США) по методике, описанной в статье Рамзаева В.П. и др. [14]. При продолжительности изме-

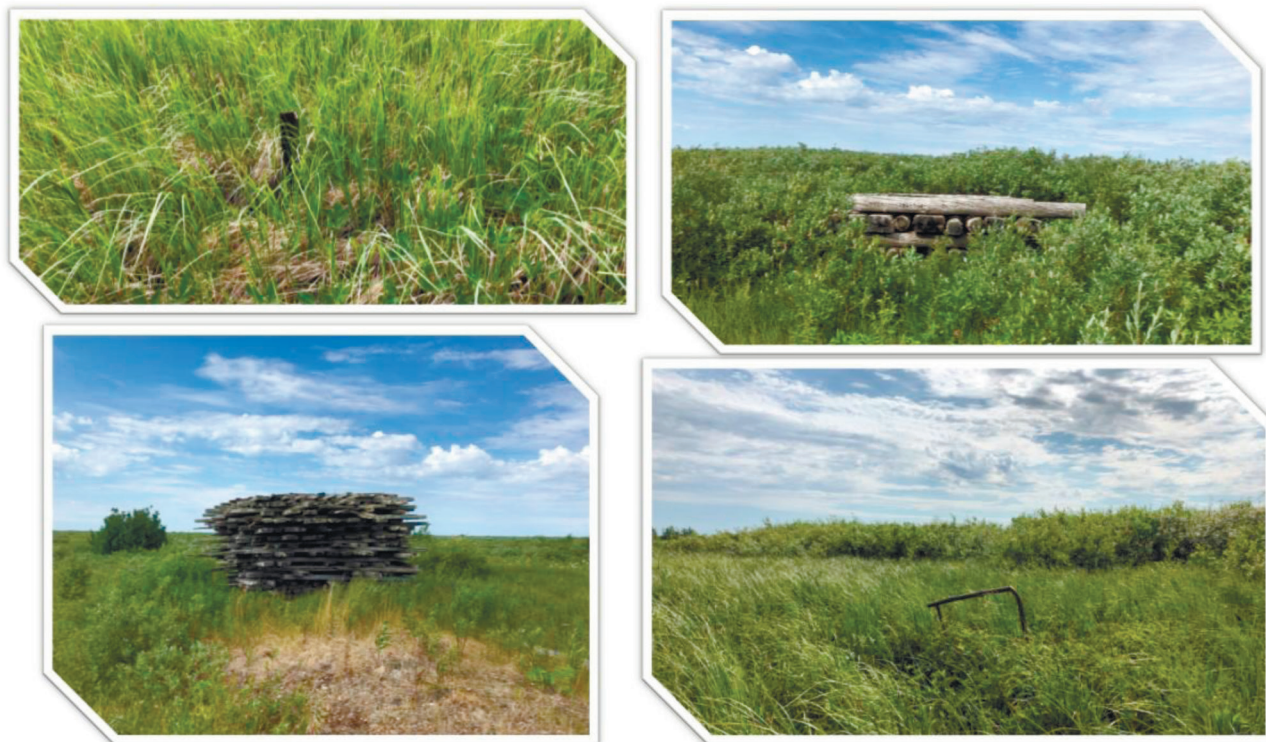


Рис. 6. Санитарное состояние охранной зоны МЯВ «Пирит»
[Fig. 6. The sanitary condition in the protected zone of the PNE “Pirit”]

Not all wells in the protected zone are equipped with concrete bollards and fences. There are no informational signs warning on radiation hazards within the boundaries of the protected zone.

The results of the $H^*(10)$ measurements recorded in the area of the PNE "Pirit" ranged from 0.050 to 0.089 $\mu\text{Sv/h}$ (mean 0.064; SD 0.006 $\mu\text{Sv/h}$) (Fig. 4), which corresponds to the levels of natural background (0,11 $\mu\text{Sv/h}$) [16]. The highest values of $H^*(10)$ were measured in points covered with rubble, and the lowest values were measured in marshy lowlands.

Field gamma-spectrometric surveys show that there are no areas of local contamination with technogenic radionuclides on the PNE "Pirit" site. Figure 7 shows an Example of spectra measured on the territory of the PNE "Pirit".

рений 360 мин минимально детектируемая активность равна 2 Бк/л. Учитывая то обстоятельство, что в действующих НРБ-99/2009 уровень вмешательства для питьевой воды имеет размерность Бк/кг (удельная активность, УА), полученные результаты также приводятся в этой же размерности. Плотность воды при 20°C была принята равной 1,00 г/см³ (округлено от 0,9982 г/см³) [15].

Картографическая визуализация точек измерений и отбора проб, а также зафиксированных особенностей ландшафта на исследованной территории выполнена с использованием геоинформационной системы MapInfo 7.8.

Доза внутреннего облучения представительного индивидуума за счет поступления ³H с питьевой водой в населенном пункте ($E_{\text{вода_нп}}$) рассчитывалась по формуле:

$$E_{\text{вода_нп}} = m_{\text{вода}} \cdot A_i^{H3} \cdot \epsilon_{H3}$$

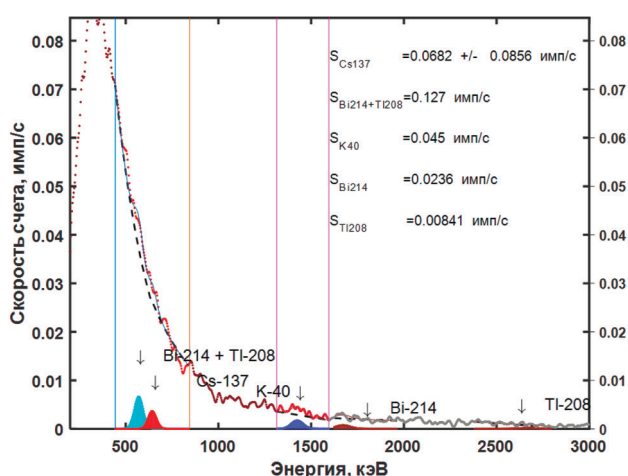


Рис. 7. Пример спектра, измеренного в ОЗ МЯВ «Пирит»
[Fig. 7. Example of spectra measured in the protected zone of the PNE "Pirit"]

The minimum value of the specific activity of tritium in the selected samples was below the minimum detectable specific activity of 2 Bq/kg. The maximum value of the specific activity in the samples was 4.15 Bq/kg (osm. 15%), while the intervention level for tritium in drinking water according to Annex 2a of NRB-99/2009 is 7600 Bq/kg. The results are generally consistent with the data of Roshydromet [16].

The results of measurements of the specific activity of tritium in water samples from settlements are presented in Table.

где:
 A_i^{H3} – максимальная удельная активность ³H в воде из *i*-го источника питьевого водоснабжения в населенном пункте; ϵ_{H3} – дозовый коэффициент при поступлении ³H с питьевой водой в организм взрослого человека, который в соответствии с НРБ-99/2009 (см. приложение 2а к НРБ-99/2009) равен $1,8 \cdot 10^{-5}$ мкЗв/Бк; $m_{\text{вода}}$ – годовое потребление воды, принятое в соответствии с НРБ-99/2009 равным 730 кг/год.

Удельная активность трития в пробах воды из населенных пунктов и рек района проведения МЯВ «Пирит»

Таблица

Activity concentration of tritium (AC) in water samples collected at settlements and rivers in the area of the "Pirit" PNE site] [Table

Место отбора [Location]	УА ³ H, Бк/кг (Т измер.=10560 с) [VA ³ H, Bq/kg]	Ошибка, % Error, %
г. Нарьян-Мар, гостиница «67 параллель» (ул. Полярная, д. 7) [Naryan-Mar, hotel "67 Parallel" (street Polyarnaya, 7)]	2,28	24
пос. Искателей, администрация заповедника «Ненецкий» [Settlement Iskateley, administration of the Nenetsky State Nature Reserve]	3,33	17
Протока Ульянов Шар перед впадением в протоку Малый Гусинец [The Ulyanov Shar arm before flowing into the Maly Gusinets arm]	2,47	22

Место отбора [Location]	УА ³ H, Бк/кг (Т измер.=10560 с) [VA ³ H, Bq/kg]	Ошибка, % Error, %
Река Большой Гусинец [River Bol'shoi Gusinets]	2,45	23
Река Захребетная Курья [River Zahrebetnaya Kurya]	2,53	22

Table shows that the maximum specific activity of ³H in water from drinking water supply sources was identified in Iskateley settlement (3.33 Bq/kg). The conservatively estimated according formula 1 internal dose to a representative individual due to ³H with drinking water in the settlement is 0.044 μSv/year. This value is negligible in comparison with the public dose limit of 1 mSv/year and three orders of magnitude lower than the permissible value of 0.3 mSv/year established in SanPiN 2.6.1.2819-10 "Ensuring the radiation safety of the population living in the regions of nuclear explosions for peaceful purposes (1965–1988)"¹.

Conclusions

Radiation survey revealed that the radiological conditions on the PNE "Pirit" site meet the requirements of SanPiN 2.6.1.2819-10 "Ensuring radiation safety of the population living in areas of nuclear explosions (1965 – 1988) for peaceful purposes". The level of ambient dose equivalent rate is at the level of fluctuations of natural regional radiation background. There are no areas with local radioactive contamination. Tritium content in water bodies is within the range of values typical for water bodies of the territory of the Russian Federation.

At the same time, not all wells are equipped with concrete bollards and fences on the territory of the "Pirit" PNE, and there are no information signs warning of a ban on drilling. On the territory there are separate dismantled wooden buildings and parts of metal structures, the boundaries of the protected zone are not marked.

To ensure long-term radiation protection, it is necessary to organize radiation monitoring of the territory adjacent to the explosion site. The materials presented in this article can serve as a basis for a comparative analysis of the results of such monitoring.

Personal participation of the authors

Biblin A.M. supervised the field part of the research, participated in collection of samples, analyzed literature data, arranged the final version of the manuscript for publication in the journal.

Khramtsov E.V. analyzed data and wrote a draft of the manuscript.

Ivanov S.A. participated in collection of samples and analyzed data.

Varfolomeeva K.V. participated in collection of samples and analyzed data.

Sednev K.A. analyzed data.

Результаты и обсуждение

Визуальное обследование территории МЯВ «Пирит» показало, что ее санитарное состояние стало значительно лучше по сравнению с данными, представленными в литературе [3]. В настоящее время территория, окружающая безаварийные скважины (скважины специального назначения), рекультивирована, площадки вокруг скважин засыпаны гравийной смесью. Однако на территории рядом со скважинами специального назначения встречаются отдельные разобранные деревянные строения и части металлоконструкций (рис. 2 и 6), границы охранной зоны не обозначены.

Места не всех скважин, находящихся на территории МЯВ, оборудованы бетонными тумбами и оградками. Информационные знаки, предупреждающие о радиационной опасности, отсутствуют.

Результаты измерений МАЭД, зафиксированных в районе проведения МЯВ «Пирит» в Ненецком АО, находились в диапазоне от 0,050 до 0,089 мкЗв/ч (среднее 0,064; ст. откл. 0,006 мкЗв/ч), что соответствует уровням естественного регионального радиационного фона, составляющего 0,11 мкЗв/ч [16]. Наиболее высокие значения МАЭД фиксировались в местах отсыпки щебнем, а наиболее низкие – в болотистых низинах.

Результаты анализа полевых спектров показали, что на территории МЯВ «Пирит» отсутствуют участки локального загрязнения техногенными радионуклидами. На рисунке 7 дан пример полевого спектра, полученного на территории, прилегающей к месту проведения МЯВ «Пирит».

Результаты измерений трития в пробах воды, отобранных в водоемах на территории объекта, показали, что минимальное значение удельной активности трития было ниже минимально детектируемой удельной активности 2 Бк/кг, а максимальное значение составило 4,15 Бк/кг (ош. 15%), что существенно меньше уровня вмешательства для трития в питьевой воде 7600 Бк/кг в соответствии с Приложением 2а НРБ-99/2009. Полученные результаты согласуются также с данными Росгидромета [17].

Результаты измерений удельной активности трития в пробах воды из населенных пунктов представлены в таблице.

Из таблицы видно, что максимальная удельная активность ³H в воде из источников питьевого водоснабжения была зафиксирована в п. Искателей (3,33 Бк/кг). Доза внутреннего облучения представительного индивидуума

¹ СанПиН 2.6.1.2819-10 «Обеспечение радиационной безопасности населения, проживающего в районах проведения (1965–1988 гг.) ядерных взрывов в мирных целях» [Sanitary Regulations and Standards 2.6.1.2819-10 "Ensuring the radiation safety of the population living in the regions of nuclear explosions for peaceful purposes (1965-1988)" (In Russ.)]

Repin V.S. provided general management of the project, secured the funding, calibrated the measuring equipment, and edited an intermediate version of the manuscript.

Bogomolova Y.M. provided management of the the field part of the research, and edited an intermediate version of the manuscript.

Acknowledgements

The authors thank the director of the Nenetsky State Nature Reserve Zolotoy Stanislav Alekseevich for his help in organizing the expedition.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Sources of Funding

Financing of the study was provided by the Federal Medical and Biological Agency of Russia (Contract No. 81.001.20.2).

References

1. Logachev VA, Voloshin NP, Dubasov YuV, Kornilovich EP. Peaceful Nuclear Explosions: Providing General and Radiation Safety during These Operations. Moscow: IzdAT Publisher, 2001. 519 p. (In Russian).
2. Logachev VA, ed. Modern Radioecological Situation in Areas of Peaceful Nuclear Explosions on the Territory of the Russian Federation. Moscow: IzdAT Publisher, 2005. 256 p. (In Russian).
3. Bogoyavlensky VI, Perekalin SO, Boichuk VM, Bogoyavlensky IV, Kargina TN. Kumzhinskoye Gas Condensate Field Disaster: reasons, results and ways of eliminating the consequences. *The Arctic: ecology and economy*. 2017;1(25): 32-46. (In Russian).
4. Nikonova AN. Transformation of Floodplain Ecosystems in the Pechora Delta within the Kumzhinsk Gas Condensate Field (Nenets Autonomous Okrug). *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2015;(5): 117-129. (In Russian.) <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2015-5-117-129>
5. Bogoyavlensky VI, Boichuk VM, Perekalin SO, Bogoyavlensky IV, Kargina TN. Katastrofa Kumzhi. *Burenie i ne t = Drilling and oil*. 2017;1: 18-24. (In Russian).
6. Puchkov AV, Yakovlev EYu. Features of the formation of the radioecological situation of the mouth of the Pechora River. *New in the knowledge of ore formation processes*. 2020: 99-102.
7. Yakovlev E, Puchkov A, Bykov V. Assessing the natural and anthropogenic radionuclide activities of the Pechora River estuary: Bottom sediments and water (Arctic Ocean Basin). *Marine Pollution Bulletin*. 2021;172(112765): 1-14. DOI:10.1016/j.marpolbul.2021.112765.
8. Yakovlev EYu, Puchkov AV. The current radioecological state of the mouth of the Pechor river. *Radioactivity and radioactive elements in environment*. 2021;1: 645-649. (In Russian).
9. Dzyuba OF, Kochubey OV. Quality of pollen grains of plants as the indicator of intensity of impact of the oil and gas complex on environment of the protected territories of Russia. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika = Oil and gas geology. Theory and practice*. 2014;9(4): 19-24. (In Russian).
10. Zelenkovsky PS, Podlipsky II, Khokhryakov VR. Problems of regulation of activity of economic entities in the development of mineral deposits within the boundaries of protected areas. *Vestnik SPbSU. Series 7. Geology. Geography* 2016;3: 60-74. (In Russian) DOI: 10.21638/11701/spbu07.2016.305.
11. Skibin SS. Exploitation of mineral resources within the territories of the limited regime of economic activities: Improving the legal regulation (for example, specially protected areas). *Trudy RGU neft i i gaza im. I.M. Gubkina = Proceedings of*

за счет поступления ^3H с данной объемной активностью, рассчитанная по формуле 1, составляет 0,044 мкЗв/год, что значительно ниже допустимого значения 0,3 мЗв/год, установленного в СанПиН 2.6.1.2819-10¹.

Заключение

Результаты исследований показали, что радиационная обстановка на территории МЯВ «Пирит» на момент исследования соответствует требованиям СанПиН 2.6.1.2819-10 «Обеспечение радиационной безопасности населения, проживающего в районах проведения (1965–1988 гг.) ядерных взрывов в мирных целях». Значения мощности амбиентного эквивалента дозы находятся в пределах колебаний естественного фона. На территории объекта не выявлены участки загрязнения техногенными радионуклидами. Уровни содержания трития в водоемах на территории МЯВ «Пирит» и в населенных пунктах находятся в пределах, характерных для Российской Федерации.

В то же время на территории МЯВ «Пирит» не все скважины оборудованы бетонными тумбами и оградками, отсутствуют информационные знаки, предупреждающие о запрете на проведение буровых работ. На территории встречаются отдельные разобранные деревянные строения и части металлоконструкций, границы охранной зоны не обозначены.

Для долговременного обеспечения радиационной безопасности необходима организация радиационного мониторинга территории, прилегающей к месту проведения взрыва. Материалы, представленные в данной статье, могут служить основой для сравнительного анализа результатов такого мониторинга.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

А.М. Библин руководил выполнением полевых исследований, провел отбор части проб, выполнил анализ литературных данных, оформил окончательный вариант рукописи для публикации в журнал.

Е.В. Храмов выполнил анализ данных, подготовил черновик рукописи.

С.А. Иванов осуществил отбор части проб и анализ данных.

К.В. Варфоломеева осуществила отбор части проб и анализ данных.

К.А. Седнев осуществлял анализ данных.

Ю.М. Богомолова организовала проведение полевых работ, отредактировала промежуточный вариант статьи.

В.С. Репин осуществлял общее руководство выполнением проекта, обеспечил привлечение финансирования, отредактировал промежуточный вариант статьи.

Благодарности

Авторы благодарят директора Государственного природного заповедника «Ненецкий» Золотого Станислава Алексеевича за помощь в организации экспедиции.

Сведения об источнике финансирования

Статья подготовлена в ходе выполнения работ по государственному контракту № 81.011.20.2 от 20 мая 2020 г.

- the I. M. Gubkin Russian State University of Oil and Gas. 2013;2 (271): 116–118. (In Russian).
12. Ramzaev VP, Medvedev AYu, Repin VS, Timofeeva MA, Khrantsov EV. Radiation monitoring the industrial nuclear explosion sites and evaluation of the doses to the critical groups of population. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2010;3(1): 33-39. (In Russian).
 13. Khrantsov EV, Repin VS, Biblin AM, Varfolomeeva KV, Ivanov SA. Radiation-hygienic characteristic of the protected zones of peaceful nuclear explosions in the Arkhangelsk region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(1): 111-123. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-1-111-123>.
 14. Ramzaev VP, Biblin AM, Repin VS, Khrantsov EV, Varfolomeeva KV. Tritium contamination of surface and ground waters at the “Dnepr” peaceful underground nuclear explosions site. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(1): 6-26. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-1-6-26>.
 15. Jones FE, Harris GL. ITS-90 Density of water formulation for volumetric standards calibration. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 1992;97(3): 335–340. DOI: 10.6028/jres.097.013.
 16. State report “On the state of sanitary and epidemiological well-being in the Russian Federation” in the Komi Republic in 2020” / Office of The Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing in the Komi Republic – Syktyvkar, 2022. 107 p.
 17. Radiation situation on the territory of Russia and neighboring states in 2020. Yearbook. NPO Typhoon. Obninsk, 2021. Available from: http://egasmro.ru/files/documents/ro_ezhegodniki/ezhegodnik_ro_2020.pdf. [Accessed Sep 2 2022].
- Received: September 15, 2022
- «Разработка и научное обоснование радиационно-гигиенических требований к охраняемым зонам мирных ядерных взрывов при переводе их в стадию консервации» (шифр: «Мирные РАО – 20»)
- ### Литература
1. Мирные ядерные взрывы: обеспечение общей и радиационной безопасности при их проведении / Колл. авторов под. рук. проф. В.А. Логачева. М.: Изд.АТ, 2001. 519 с.
 2. Современная радиозоологическая обстановка в местах проведения мирных ядерных взрывов на территории Российской Федерации / Колл. авторов; под рук. проф. В.А. Логачева. М.: ИздАТ, 2005. 256 с.
 3. Богдавленский В.И., Перекалин С.О., Бойчук В.М., Богдавленский И.В. Катастрофа на Кумжинском газоконденсатном месторождении: причины, результаты, пути устранения последствий // Арктика: экология и экономика. 2017. № 1 (25). С. 32–46.
 4. Никонова А.Н. Трансформация пойменных экосистем дельты Печоры в зоне влияния Кумжинского газоконденсатного месторождения (Ненецкий автономный округ) // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2015, № 5. С. 117-129.
 5. Богдавленский В.И., Бойчук В.М., Перекалин С.О. и др. Катастрофа Кумжи // Бурение и нефть. 2017. № 1. С. 18-24.
 6. Пучков А.В., Яковлев Е.Ю. Особенности формирования радиозоологической обстановки устьевой части реки Печора // Новое в познании процессов рудообразования: Труды молодых учёных, посвященные 90-летию ИГЕМ РАН. Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской Академии наук, 2020. С. 99-102. EDN PFHMSG
 7. Yakovlev E., Puchkov A., Bykov V. Assessing the natural and anthropogenic radionuclide activities of the Pechora River estuary: Bottom sediments and water (Arctic Ocean Basin) // Marine Pollution Bulletin. 2021. Vol. 172. P. 112765. – DOI:10.1016/j.marpolbul.2021.112765.
 8. Яковлев Е. Ю., Пучков А.В. Современное радиозоологическое состояние устьевой части реки Печора // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы VI Международной конференции. В 2-х томах, Томск, 20–24 сентября 2021 года. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2021. С. 645-649. EDN KBGGFK
 9. Дзюба О.Ф., Кочубей О.В. Качество пыльцы растений как индикатор интенсивности воздействия нефтегазового комплекса на природную среду охраняемых территорий России // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2014. Т. 9. № 4. С. 11. doi: 10.17353/2070-5379/48_2014.
 10. Зеленковский П.С., Подлипский И.И., Хохряков В.Р. Проблемы регулирования деятельности хозяйствующих субъектов при разработке месторождений полезных ископаемых в границах особо охраняемых природных территорий // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. 2016. № 3. С. 60-74. DOI 10.21638/11701/spbu07.2016.305.
 11. Скибин С.С. Недропользование в пределах территорий с ограниченным режимом осуществления хозяйственной деятельности: проблемы совершенствования правового регулирования (на примере особо охраняемых природных территорий) // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина, 2013. № 2(271). С. 111-118.
 12. Рамзаев В.П., Медведев А.Ю., Репин В.С., и др. Радиационно-гигиенический мониторинг в местах применения ядерно-взрывных технологий в мирных целях и расчет доз облучения критических групп населения // Радиационная гигиена. 2010. Т. 3, № 1. С. 33-39.

13. Храмов Е.В., Репин В.С., Библин А.М. и др. Радиационно-гигиеническая характеристика охранных зон мирных ядерных взрывов в Архангельской области // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 1. С. 111-123. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-111-123.
14. Рамзаев В.П., Библин А.М., Репин В.С. и др. Загрязнение третию поверхностных и подземных вод в месте проведения мирных подземных ядерных взрывов серии «Днепр» // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 1. С. 6-26. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-6-26.
15. Jones F.E., Harris G.L. ITS-90 Density of water formulation for volumetric standards calibration // Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. 1992. Vol. 97, No. 3. P. 335-340. DOI: 10.6028/jres.097.013.
16. Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия в Российской Федерации» по Республике Коми в 2020 году / Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Республике Коми – г. Сыктывкар, 2022. 107 с.
17. Радиационная обстановка по территории России и сопредельных государств в 2020 г. Ежегодник. НПО «Тайфун». Обнинск, 2021. URL: https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/f39/ezhegodnik_ro_2021_.pdf. (Дата обращения: 02.09.2022).

Поступила: 15.09.2022 г.

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

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

Viktor S. Repin – Doctor of Biological Sciences, Head of Ecology Laboratory of Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

Sergey A. Ivanov – junior research scientist, Radiochemical laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

Kseniya V. Varfolomeeva – Junior research scientist, 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 Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

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

Yuliya M. Bogomolova – Head of the Research Department of the Institution «Nenetsky State Nature Reserve», Iskateley, Russia

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

Храмов Евгений Витальевич – 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

Репин Виктор Степанович – доктор биологических наук, заведующий лабораторией экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Иванов Сергей Анатольевич – младший научный сотрудник радиохимической лаборатории 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

Седнев Константин Андреевич – исполняющий обязанности младшего научного сотрудника 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

Богомолова Юлия Михайловна – начальник научно-исследовательского отдела Государственного природного заповедника «Ненецкий», п. Искателей, Россия

For citation: Biblin A.M., Khrantsov E.V., Repin V.S., Ivanov S.A., Varfolomeeva K.V., Sednev K.A., Bogomolova Y.M. Radiation situation at the “Pirit” peaceful underground nuclear explosion site. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 4. P. 149-161. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-149-161

Для цитирования: Библин А.М., Храмцов Е.В., Репин В.С., Иванов С.А., Варфоломеева К.В., Седнев К.А., Богомолова Ю.М. Радиационная обстановка в районе проведения мирного ядерного взрыва «Пирит» // *Радиационная гигиена*. 2022. Т. 15, № 4. С. 149-161. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-149-161

Генриэтта Владимировна Архангельская (к 65-летию трудовой деятельности в ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева)

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

В декабре 2022 г. исполняется 65 лет, как Генриэтта Владимировна Архангельская (доктор медицинских наук, главный научный сотрудник лаборатории экологии, авторитетный ученый в области радиационной гигиены, радиобиологии, радиотоксикологии и высококвалифицированный специалист в области организации информационной работы с населением по вопросам радиационной безопасности, участник ликвидации последствий аварий на ПО «Маяк» и Чернобыльской АЭС) работает в ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева.

Основные направления ее научных исследований: изучение влияния повышенного естественного радиационного фона на состояние здоровья и физическое развитие населения; оценка метаболизма радиоактивных веществ в организме с целью гигиенического нормирования; разработка мер по профилактике поступления и ускорению выведения радиоактивных веществ из организма; изучение социально-психологических последствий у населения территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, с целью их смягчения; оценка уровней радиационно-гигиенических знаний у населения, проживающего на территориях потенциального радиоактивного загрязнения (регионы проведения мирных ядерных взрывов и районы Дальнего Востока после аварии на АЭС «Фукусима»); определение информационных потребностей населения, проживающего на радиоактивно загрязненных территориях, их предпочтения в способах получения информации с целью оптимизации информирования населения по вопросам радиационной безопасности.

В декабре 1957 г. к.м.н. Г.В. Архангельская по распоряжению заместителя министра здравоохранения РСФСР была направлена на работу в ЛенНИИ радиационной гигиены (сейчас ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева), где начала свою трудовую деятельность с должности младшего, а с 1959 г. – старшего научного сотрудника лаборатории радиационной защиты. С 1962 по 1964 г. Г.В. Архангельская работала на должности ученого секретаря института и успешно сочетала эту деятельность с выполнением обязанностей старшего научного сотрудника и заместителя руководителя лаборатории радиационной защиты.

В первые годы темой ее научной деятельности было изучение физических методов дезактивации тканей защитной одежды, используемой в районах с высокими уровнями радиоактивного загрязнения местности и на объектах Министерства среднего машиностроения. Генриэтта Владимировна принимала участие в работах по ликвидации последствий радиационной аварии на ПО

«Маяк» в Челябинской области (1958 г.), за что получила статус ликвидатора.

Работы, относящиеся к периоду 1958–1964 гг., можно разделить на два направления. К первому направлению относятся исследования влияния естественного повышенного радиационного фона на состояние здоровья и физическое развитие населения, проживающего в этих районах. Разработанные методические указания были одобрены Министерством здравоохранения РСФСР в качестве основного документа при проведении исследований в указанных районах. Второе направление – изучение метаболизма радиоактивных веществ в организме с целью гигиенического нормирования, разработка мер по профилактике поступления и ускорению выведения радиоактивных веществ из организма. В 1962 г. Г.В. Архангельская была назначена ответственным исполнителем темы «Защита организма в условиях комбинированного радиационного поражения». С 1966 г. Генриэтта Владимировна принимала активное участие в исследованиях защиты организма от осколочных изотопов йода.

По результатам этих исследований разработаны инструкции по проведению йодной профилактики в случае аварии ядерного реактора (1967), методические указания по вопросу защиты от радиоактивного йода для населения, проживающего вокруг АЭС (1971). Результаты исследований 1966–1970 гг. были обобщены в докторской диссертационной работе на тему: «К проблеме защиты человека от радиоактивного йода» по специальности «Гигиена» (1971). В 1972 г. весь полученный опыт был представлен в монографии «Радиоактивный йод в проблеме радиационной безопасности».

В 1986 г. в качестве специалиста по радиационной гигиене Г.В. Архангельская приняла активное участие в работе по ликвидации медицинских последствий аварии на Чернобыльской АЭС, за что была отмечена правительственной наградой – медалью «За трудовую доблесть».

С 1987 г. Генриэтта Владимировна была назначена ответственным исполнителем фрагментов Союзной и Республиканской программ и Приказа министра здравоохранения РСФСР по совершенствованию пропаганды радиационно-гигиенических знаний среди населения, в рамках которых являлась ответственным исполнителем 8 научных тем, связанных с изучением социально-психологических последствий радиационных аварий у населения и с разработкой мероприятий по их снижению. Результаты исследований отражены в многочисленных научных публикациях, докладах и пособиях.

В течение 2009–2011 гг. принимала активное участие в международной программе Союзного государства под

эгидой МЧС по смягчению социально-психологических последствий для населения загрязненных территорий России и Белоруссии после аварии на Чернобыльской АЭС. С участием Г.В. Архангельской были разработаны многочисленные лекции, учебные материалы, разработана программа повышения квалификации руководящих работников и специалистов по специальности «Радиационная гигиена», проведены обучающие семинары для врачей, работников Роспотребнадзора, представителей местных властей, социальных работников и учителей по вопросам радиационной безопасности и правилам проживания на загрязненных территориях в отдаленные периоды радиационной аварии.

Итоги научной деятельности Г.В. Архангельской нашли воплощение более чем в 300 публикациях, которые известны как в нашей стране, так и за рубежом, являются фундаментальными в решении многих вопросов обеспечения радиационной безопасности и социально-психо-

логической реабилитации населения, проживающего на загрязненных территориях.

За безупречный и добросовестный труд Г.В. Архангельская награждена медалями «За трудовую доблесть», «Ветеран труда», «Имени профессора П.В. Рамзаева» и «95 лет Госсанэпидслужбе России», значком «Отличник здравоохранения», ведомственным нагрудным знаком МЧС России «За заслуги», памятным знаком «Участник ликвидации последствий аварии в 1957 г. на ПО «Маяк»», отмечена почетными грамотами от МЗ РФ, Роспотребнадзора, ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева.

Коллектив ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева сердечно поздравляет Генриэтту Владимировну с 65-летием работы в нашем Институте, желает крепкого здоровья, творческих успехов, продолжения успешного трудового пути в науке.

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 А4 шрифтом Times New Roman кеглем 14, с межстрочным интервалом 1,5. Ориентация книжная (портрет) с полями слева – 2,5 см, сверху – 2 см, справа – 1,5 см, снизу – 2 см. Нумерация страниц – сверху в центре, первая страница без номера. Формат документа при отправке в редакцию – .doc или .docx.

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) страны производителя. 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 вариабельности 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 таблицей в тексте обязательно должна быть ссылка. В подписях к микрофотографиям, электронным микрофотографиям обязательно следует указывать метод окраски и обозначать масштабный отрезок. Диаграммы должны быть представлены в исходных файлах.

Рисунки (диаграммы, графики) должны иметь подпись всех осей с указанием единиц измерения СИ. Легенда выносится за пределы рисунка.

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 5177212001. Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Входные и выходные параметры и типы соединений. Технические требования [перевод на английский язык (In Russ.)].

Подстрочные ссылки (сноски):

¹ СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» [Sanitary Regulations and Standards 2.2.4.3359-16 «Sanitary and epidemiological requirements for physical factors in the workplace» (In Russ.)]

¹ МУ 2.6.1.2944-11. Контроль эффективных доз облучения пациентов при медицинских рентгенологических исследованиях. М.: Роспотребнадзор, 2011. 40 с. [Methodical guidelines 2.6.1.2944-11 “Control of the patient effective doses from medical X-ray examinations”. Moscow, Rosпотребнадзор, 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., Сосякин А.Е. и др. Пат. № 2268031 Российская Федерация, МПК А61Н23.00. Способ коррекции отдаленных последствий радиационного воздействия в малых дозах. опубл. 20.01.2006, БИ № 02.

Из газеты:

Фомин Н.Ф., Иванович Ф.А., Веселов Е.И. Выдающийся ученый, педагог, воспитатель. // Воен. врач, 1996. № 8 (1332) С. 5.

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, Flanigan 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 (титальный 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, фабрикации 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.