

СКРИНИНГ АКТИВНОСТИ ИНКОРПОРИРОВАННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ У ПЕРСОНАЛА НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Ю. С. Турлаков¹, Ю. В. Грабский, Д. В. Арефьева², А. А. Шаяхметова, В. Б. Фирсанов, А. В. Петушок

Научно-исследовательский институт промышленной и морской медицины Федерального медико-биологического агентства, Санкт-Петербург, Россия

Исследование особенностей формирования радиационной обстановки на рабочих местах и оценка индивидуальных эффективных доз облучения персонала научно-исследовательских организаций при выполнении работ с открытыми источниками ионизирующих излучений (ИИИ) является актуальной научной задачей в связи с наличием дополнительных рисков из-за вариативности условий и режимов выполнения технологических операций. Целью работы было оценить условия труда и поступление радионуклидов в организм персонала АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина», работающего с открытыми ИИИ. Данные об уровне воздействия производственных факторов радиационной природы на персонал получены в ходе дозиметрических, радиометрических и спектрометрических измерений. Установлено, что радиационная обстановка на рабочих местах персонала характеризуется широким диапазоном уровней мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (0,10–122 мкЗв/ч), наличием поверхностного загрязнения рабочих поверхностей альфа- и бета-частицами, наличием загрязнения радиоактивными веществами воздуха рабочих помещений. В результате спектрометрических исследований обнаружено наличие у отдельных лиц из персонала ¹²⁵I в щитовидной железе (до 9850 Бк), ⁹⁰Sr — в скелете (до 16 500 Бк), ¹³⁷Cs — во всем теле (до 1100 Бк) и др. Результаты исследований могут быть основой для разработки мероприятий по повышению качества контроля индивидуальных доз внутреннего облучения и эффективности медицинского обеспечения персонала научно-исследовательских организаций, имеющего контакт с открытыми ИИИ.

Ключевые слова: внутреннее облучение, персонал, радиационный фактор, условия труда

Финансирование: Государственный контракт от 15.07.2019 № 35.102.19.2 на выполнение прикладной научно-исследовательской работы «Обоснование направлений совершенствования системы контроля внутреннего облучения персонала научно-исследовательских институтов, обслуживаемых Федеральным медико-биологическим агентством (на примере АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина»)» (шифр «СИЧ-19»).

Вклад авторов: Ю. С. Турлаков¹, Ю. В. Грабский — общее руководство исследованием, финальная редакция статьи; Д. В. Арефьева — планирование, организация и анализ результатов исследования, подготовка статьи; А. А. Шаяхметова — проведение радиометрических исследований, обработка и анализ полученных данных; В. Б. Фирсанов — проведение спектрометрических, дозиметрических и радиометрических исследований, обработка полученных данных; А. В. Петушок — проведение дозиметрических и радиометрических исследований, обработка полученных данных.

✉ **Для корреспонденции:** Дарья Владимировна Арефьева
пр. Юрия Гагарина, д. 65, литер А, г. Санкт-Петербург, 196128, Россия; niipmm.210@gmail.com

Статья получена: 24.03.2022 **Статья принята к печати:** 04.05.2022 **Опубликована онлайн:** 18.05.2022

DOI: 10.47183/mes.2022.014

SCREENING THE ACTIVITY OF INCORPORATED RADIONUCLIDES IN THE RESEARCH ORGANIZATION EMPLOYEES

Turlakov YuS¹, Grabsky YuV, Arefeva DV², Shayakhmetova AA, Firsanov VB, Petushok AV

Scientific Research Institute of Marine and Industrial Medicine of the Federal Medical and Biological Agency, St. Petersburg, Russia

Studying the features of radiological situation in the workplace and assessing the individual effective doses in employees of research organizations working with open radiation sources (RS) are an urgent scientific task due to additional risks resulting from variability in the conditions and regimes of the technological operations. The study was aimed to assess the working conditions and intake of radionuclides by the employees of the V. G. Khlopin Radium Institute working with open RS. The data on exposure to work-related radiation factors were obtained by dosimetry, radiometry, and spectrometry. It was found that radiological situation in the employees' workplaces was characterized by the broad range of the gamma ambient dose equivalent rate values (0.10–122 μSv/h), alpha and beta working surface contamination, radioactive pollution of air in the working areas. In some individuals, spectrometry revealed the following: ¹²⁵I in the thyroid gland (up to 9,850 Bq), ⁹⁰Sr in the skeleton (up to 16,500 Bq), ¹³⁷Cs in the whole body (up to 1,100 Bq), etc. The findings can provide the basis for developing the measures to improve the quality of individual internal dose control and the efficiency of medical care provision to the research organization employees dealing with open RS.

Keywords: internal exposure, personnel, radiation factor, working conditions

Funding: state contract dated July 15, 2019 № 35.102.19.2 on implementation of the applied research project Justification of Directions for Improving the Internal Exposure Monitoring System for Employees of Research Institutes Serviced by the Federal Medical and Biological Agency (on the example of V. G. Khlopin Radium Institute) (code: SIЧH-19).

Author contributions: Turlakov YuS¹, Grabsky YuV — overall study management, final version of the article; Arefeva DV — planning, arrangement, analysis of the research results, manuscript writing; Shayakhmetova AA — radiometric survey, data processing and analysis; Firsanov VB — spectrometry, dosimetry, and radiometric survey, data processing; Petushok AV — dosimetry and radiometric survey, data processing.

✉ **Correspondence should be addressed:** Daria V. Arefeva
Yuri Gagarin prospect, 65, liter A, St. Petersburg, 196128, Russia; niipmm.210@gmail.com

Received: 24.03.2022 **Accepted:** 04.05.2022 **Published online:** 18.05.2022

DOI: 10.47183/mes.2022.014

Активное развитие атомной промышленности и ядерной медицины приводит к увеличению объемов работ с радиоактивными веществами, в том числе с открытыми источниками ионизирующих излучений. При выполнении таких работ на персонал воздействует комплекс вредных и (или) опасных производственных факторов радиационной природы: мощность амбиентного эквивалента дозы

гамма-излучения, загрязнение поверхностей альфа- и бета-частицами, загрязнение воздуха рабочих помещений радиоактивными веществами, что увеличивает риск поступления радионуклидов в организм работников. Обязательная оценка внутреннего облучения и прогнозирование последствий его воздействия на здоровье человека является актуальной научной

проблемой, которая несмотря на достигнутые успехи экспериментальных и клинических исследований в этой области остается недостаточно изученной [1, 2].

Использование открытых источников ионизирующих излучений (ИИИ) при проведении научных исследований сопряжено с дополнительными рисками из-за вариативности условий и режимов выполнения технологических операций в зависимости от решаемых задач. Согласно данным производственного контроля, индивидуальная эффективная доза внутреннего облучения работников предприятий и организаций, чья профессиональная деятельность связана с источниками ионизирующих излучений, не превышает предельно допустимых значений. Вместе с тем, в ряде случаев, особенно при выполнении нестандартных технологических операций или в нестандартных ситуациях, возрастает риск поступления и накопления в организме работников радионуклидов, присутствующих в производственной среде. В зависимости от путей поступления и физико-химических свойств радионуклидов различают способы оценки ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения, которую в настоящее время проводят либо по данным дозиметрического контроля рабочих мест, либо по данным индивидуального дозиметрического контроля (прямыми или косвенными методами измерений) [3].

В ходе профессиональной деятельности персонал получает облучение так называемыми «малыми дозами», для которых характерен риск возникновения стохастических эффектов [4, 5]. В связи с этим при прогнозировании последствий радиационного воздействия на организм человека от внутреннего облучения необходимо также учитывать вид излучений (альфа-, бета-, гамма- и др.), длительность периода полураспада инкорпорированных радионуклидов, длительность их пребывания в организме, локализацию в органах и тканях.

Целью настоящего исследования было провести радиационно-гигиеническую оценку условий труда и поступления радионуклидов в организм персонала АО «Радиовый институт им. В. Г. Хлопина», работающего с открытыми источниками ионизирующих излучений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования: система индивидуального дозиметрического контроля внутреннего облучения персонала научно-исследовательской организации, работающего с открытыми источниками ионизирующих излучений (ИИИ).

Исследование выполнено в 2019–2021 гг. на базе АО «Радиовый институт им. В. Г. Хлопина».

Для получения исходных данных о характеристиках вредных и (или) опасных производственных факторов радиационной природы, воздействующих на обследуемый персонал, были проведены измерения следующих величин:

- мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения;
- спектрального состава гамма-излучающих радионуклидов на рабочих местах (спектрометрические измерения);
- снимаемого радиоактивного загрязнения рабочих поверхностей;
- плотности потока альфа- и бета-частиц;
- объемной активности радионуклидов в воздухе рабочих помещений.

Измерение МАЭД гамма-излучения проводили с использованием дозиметра ДКС-АТ1123 («Атомтех»;

Республика Беларусь) в соответствии с требованиями Руководства по эксплуатации на прибор и Методическими указаниями МУ 2.6.5.008-2016 «Контроль радиационной обстановки. Общие требования». Для получения картины формирования радиационных полей на рабочем месте измерения выполняли в каждой точке на четырех высотах от пола: 0,1 м, 1 м, 1,4 м и 1,7 м. Измерение уровней загрязнения рабочих поверхностей бета- и альфа-частицами проводили с использованием дозиметра-радиометра МКС-АТ1117М («Атомтех»; Республика Беларусь) в соответствии с требованиями Руководства по эксплуатации на прибор. Расширенную относительную неопределенность ($k = 2$) измерения принимали равной относительной погрешности средства измерения в предположении нормального распределения показаний.

Измерение снимаемого поверхностного загрязнения осуществляли косвенным методом путем снятия мазков и последующего определения их активности в соответствии с нормативными документами [6, 7], расчет неопределенности измерений проводился по методике выполнения измерений [7].

Пробы воздуха в рабочих помещениях для определения объемной активности воздуха отбирали с использованием аспиратора ПА-300М-1 («Экотех-Урал»; Россия) на аэрозольные фильтры АФА РСР-20 (ООО «Технологии электроформирования», Россия) и йодные фильтры АФА СРФ-20 (ООО «Технологии электроформирования», Россия) в соответствии с требованиями Руководства по эксплуатации на прибор с дальнейшим измерением на спектрометре-радиометре МКГБ-01 «РАДЭК» (НТЦ «РадЭК»; Россия). Расширенную неопределенность измерения рассчитывали с учетом погрешности определения коэффициента чувствительности спектрометра (8%), погрешности определения объема отобранной пробы атмосферного воздуха (10%) и методической погрешности, обусловленной несоответствием состава счетного образца (5%), которая составила 16%.

Спектрометрическое обследование персонала, выполняющего работы с ИИИ (45 человек, из них 34 — в 2019 г. и 21 — в 2020 г.), и персонала контрольной группы (10 человек) осуществляли с использованием метода прямого измерения содержания радионуклидов в организме или органе человека с применением спектрометров излучения человека СЕГ-10П-02 (НТЦ «РадЭК»; Россия) и СИЧ-100 (ФГБУН НИИ ПММ ФМБА России; Россия). Критерии включения в исследование: работа с открытыми ИИИ в течение последнего года перед проведением обследования. Критерии включения в группу контроля: отсутствие контакта с открытыми ИИИ при работе. Измерения выполняли путем регистрации фотонного излучения, исходящего от тела человека. На спектрометре СИЧ-100 измерения проводили в геометрии «линейное продольное сканирование», на спектрометре СЕГ-10П-02 — в геометрии измерения «легкие» и «щитовидная железа». Определение содержания радионуклида ^{90}Sr в костной ткани скелета проводили по спектру тормозного излучения в энергетическом интервале 50–150 кэВ, регистрируемого двумя сцинтилляционными блоками детектирования на основе монокристаллов CsI(Tl) размером $\varnothing 150 \times 3$ мм, входящими в состав установки СИЧ-100. Продолжительность измерения составила 30 мин на каждом спектрометре.

Градуировку спектрометра СИЧ-100 проводили с помощью унифицированного фантома УФ-02Т и антропоморфного фантома АРДФ-11-С с радионуклидом

Таблица 1. Результаты измерений МАЭД гамма-излучения, плотности потока альфа- и бета-частиц на рабочих местах персонала

Содержание работ на рабочем месте	Диапазон измеренных значений МАЭД, мкЗв/ч	Максимальные значения плотности потока, частиц/(см ² × мин)	
		альфа-частиц	бета-частиц
Аналитические операции с высокоактивными растворами, гамма-абсорбциометрия, работа с образцами проб в вытяжных шкафах и боксе	4,0–53,0	30	1830
Технологические операции с высокоактивными растворами, фасовка и выдача препаратов ⁹⁰ Sr	5,0–122,0	Нет данных	1100
Вскрытие ампул, растворение, калибровка растворов и изготовление источников	3,4–56,0	4,2	4000
Приготовление имитационного раствора, содержащего ⁹⁰ Sr, ¹³⁷ Cs, ²⁴¹ Am, ¹⁵² Eu и другие изотопы. Экстракционное выделение ⁹⁰ Sr, ¹³⁷ Cs из имитационного раствора. Приготовление азотнокислого раствора ²³⁸ U и ²³⁹ Pu. Получение порошков оксидов ²³⁸ U и ²³⁹ Pu, сорбционная очистка от примесей, фасовка	0,5–4,3	0,8	15
Фасовка ¹²⁵ I	0,9–18,2	< 0,1	1680
Экстракционное и хроматографическое разделение продуктов переработки отработавшего ядерного топлива и облученного ²²⁶ Ra	0,4–4,6	29	32
Операции по приему, рубке, хранению и передаче отработавшего ядерного топлива и высокоактивных материалов, перефасовке и выгрузке радиоактивных отходов	0,1–0,6	0,4	30
Растворение, осаждение, выпаривание, осветление компонентов отработавшего ядерного топлива	0,1–0,2	< 0,1	200
Экстракция, выпаривание, отверждение радиоактивных отходов	0,1–0,3	< 0,1	20
Работы по дезактивации и ремонту технологического оборудования, сортировка, упаковка и подготовка к вывозу радиоактивных отходов	11,0–54,5	78	1680

Примечание: значения вычислены с учетом расширенной неопределенности измерений ($k = 2$).

⁹⁰Sr в скелете. Фантом УФ-02Т представлен набором полиэтиленовых блоков и набором стержневых радионуклидных источников, которые на месте эксплуатации были собраны в виде моделей — фантомов тела человека с заданным содержанием радионуклидов. Фантом АРДФ-11-С представляет собой сборную конструкцию, состоящую из антропоморфных моделей органов (щитовидной железы, печени, легких, почек и др.), скелета и покровных тканей, изготовляемых из материалов-имитаторов биологических тканей, адекватных тканям тела человека в отношении взаимодействия с ионизирующим излучением.

Для градуировки спектрометра излучений человека СЕГ-10П-02 в геометрии «легкие» применяли способ прямой градуировки с использованием фантома грудной клетки ФЛТ-05 в сборе с фантомом «стандартного» взрослого человека (масса — 70 кг, рост — 170 см). Внутри фантома грудной клетки расположен полиуретановый блок — имитатор легких, оснащенный объемными ИИИ с радионуклидами ⁶⁰Co, ¹⁵²Eu и ²⁴¹Am. Градуировку проводили последовательно с каждым из указанных радионуклидов.

Для измерения активности ¹²⁵I в щитовидной железе применяли блок детектирования на основе «тонкого» монокристалла NaI(Tl), который был предварительно откалиброван по характеристическому излучению ¹³³Ba с использованием фантома щитовидной железы ФЩЖ-04Т. Фантом представляет собой модель шеи человека с вложенными в его полость двумя радионуклидными источниками ¹³³Ba, расположенными соответственно долям щитовидной железы. Поскольку в поле детектирования прибора помимо щитовидной железы также попадают кровеносные сосуды шеи, для учета их вклада проводили измерение фонового энергетического спектра излучения от области предплечья.

Расширенную неопределенность для уровня доверия $P = 0,95$ и коэффициента охвата $k = 2$ для спектрометров

СЕГ-10П-02 и СИЧ-100 рассчитывали с учетом погрешности определения коэффициентов чувствительности спектрометра по фантомам (8%), методической погрешности, обусловленной неравномерностью распределения активности в теле и органах человека (10%) и методической погрешности, обусловленной неполной адекватностью фантомов и тела человека (20%), которая составила 24%.

Статистическую обработку данных проводили с использованием стандартных методов, применяемых при анализе радиационно-гигиенических и медико-биологических данных. Для всех показателей рассчитывали среднее арифметическое, медиану, стандартную ошибку среднего значения, достоверность различий при условии значимости $p = 0,95$. Все вычисления проводили с использованием современных программных продуктов (Microsoft Excel, версия Professional Plus 2010; США), предназначенных для работы с электронными таблицами, а также визуализации и анализа данных.

Условия труда персонала оценивали в соответствии с нормативными документами [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При проведении радиационно-гигиенического исследования рабочих мест персонала научно-исследовательской организации было обследовано 17 производственных помещений, в которых выполняются работы с открытыми ИИИ. Результаты измерений мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения, плотности потока альфа- и бета-частиц на рабочих местах персонала приведены в табл. 1.

Наибольшие уровни МАЭД гамма-излучения имеют место при выполнении работ с высокоактивными растворами. Максимальные значения плотности потока бета-частиц зарегистрированы при выполнении работ по

Таблица 2. Характеристики внутреннего облучения обследованного персонала

Радионуклид	Активность радионуклида, Бк	Ожидаемая эквивалентная доза внутреннего облучения, мЗв в год
^{137}Cs	120–1100	0,001–0,004 (на все тело)
^{90}Sr	5200–16500	0,3; 0,9 (на костную ткань)
^{226}Ra	360–770	0,47–1,00 (на костную ткань)
^{223}Ra	550–2800	0,9; 4,8 (на костную ткань)
^{125}I	2930–9850	0,18–2,1 (на щитовидную железу)
^{60}Co	840	0,03 (на легкие)

вскрытию ампул, растворению, калибровке растворов и изготовлению источников. На рабочих местах было также зафиксировано радиоактивное загрязнение поверхностей альфа-частицами в количестве, не превышающем нормативные значения в соответствии с требованиями НРБ-99/2009. В связи с наличием поверхностного загрязнения на рабочих местах персонала дополнительно были проведены измерения снимаемой поверхностной активности и объемной активности радионуклидов в воздухе рабочей зоны.

По результатам измерения уровней загрязнения поверхностей альфа- и бета-частицами на рабочих местах персонала зарегистрировано наличие снимаемой поверхностной активности в количестве, не превышающем допустимые значения, установленные в НРБ-99/2009 [9]. Наибольшие уровни снимаемого загрязнения поверхностей бета-частицами (^{90}Sr) зарегистрированы при работах по вскрытию ампул, растворению, калибровке растворов и изготовлению источников.

По результатам измерений объемной активности радионуклидов в воздухе рабочей зоны наибольшие значения зарегистрированы при работах с радионуклидами ^{125}I и ^{137}Cs (объемная активность ^{125}I — 240 Бк/м³, ^{137}Cs — 315 Бк/м³).

На основании результатов радиационного контроля в соответствии с требованиями нормативного документа [8] проведены расчеты максимальной потенциальной эффективной дозы персонала при выполнении технологических операций. Установлено, что условия труда персонала, работающего с открытыми ИИИ, по характеристикам воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов радиационной природы находятся в диапазоне от допустимых (класс 2) до опасных (класс 4).

Согласно данным за 2016–2019 гг., значения индивидуальных эффективных доз внешнего облучения персонала в среднем составили 3,4 мЗв в год, что значительно ниже установленного предела доз облучения для персонала группы А. Наибольшие значения зарегистрированы у работников по специальности «ведущий инженер-технолог» и в среднем за четыре года составили 7,5 мЗв.

При проведении спектрометрического обследования у ряда лиц из персонала, осуществляющего работу с открытыми ИИИ, было выявлено наличие в организме инкорпорированных радионуклидов (табл. 2). В таблице представлены также значения ожидаемой эквивалентной дозы внутреннего облучения персонала, обусловленной

поступлением радионуклидов в организм. Расчет производили с учетом полученных данных спектрометрии справочных дозовых коэффициентов [10, 11].

Кроме представленных в табл. 2 радионуклидов, у троих работников обнаружен инкорпорированный ^{241}Am . Ввиду отсутствия необходимой градуировки использованного измерительного оборудования определение точных значений активности данного радионуклида в скелете не представляется возможным.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно полученным результатам радиометрических исследований, радиационная обстановка на рабочих местах персонала научно-исследовательской организации, выполняющего работы с открытыми ИИИ, можно охарактеризовать:

- широким диапазоном уровней МАЭД гамма-излучения (0,10–122 мкЗв/ч);

- наличием поверхностного загрязнения рабочих поверхностей альфа- и бета-частицами (в отобранных мазках с рабочих поверхностей обнаружены следующие радионуклиды: ^{137}Cs , ^{125}I , ^{241}Am , ^{154}Eu , ^{243}Am с дочерним продуктом распада ^{239}Np и ^{223}Ra с дочерним продуктом распада ^{211}Bi);

- наличием загрязнения радиоактивными веществами воздуха рабочих помещений (в том числе такими радионуклидами, как ^{125}I и ^{137}Cs).

У отдельных лиц установлено наличие ^{125}I в щитовидной железе (до 9850 Бк), ^{90}Sr — в скелете (до 16500 Бк), ^{137}Cs — во всем теле (до 1100 Бк). Обращает на себя внимание обнаружение поступления в организм работников ^{223}Ra , период полураспада которого составляет 11 дней и вклад которого в дозу внутреннего облучения значительно выше по сравнению с другими радионуклидами.

Факт инкорпорации радионуклидов подтвержден периодическими спектрометрическими исследованиями одних и тех же работников в 2019 и 2020 г. Данный персонал следует отнести к группе повышенного риска развития профессиональных, производственно обусловленных и хронических заболеваний.

В настоящее время в рассматриваемой научно-исследовательской организации контроль ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения персонала проводят расчетными методами (по данным дозиметрического контроля рабочих мест), который недостаточно эффективен при выполнении работ с широким перечнем радионуклидов, в том числе

короткоживущих. В связи с этим одним из направлений повышения эффективности системы дозиметрического контроля внутреннего облучения персонала, работающего с открытыми ИИИ, является разработка программы проведения скрининговых исследований с использованием портативных спектрометров. Целью исследований является установление факта поступления радионуклидов в организм и определение их состава. В случае обнаружения поступления радионуклида в организм работника — проведение исследований на высокоточных спектрометрах излучения человека в специализированных учреждениях. Такой подход предоставит сотрудникам службы радиационной безопасности основные инструменты для эффективной реализации программы контроля внутреннего облучения [12–14].

С целью накопления и статистической обработки данных об уровнях внешнего и внутреннего облучения персонала в условиях планируемого облучения, а также результатов периодических медицинских осмотров разработана и зарегистрирована база данных [15]. Внедрение ее в практику позволит оценить общие тенденции в профессиональном облучении персонала и проанализировать результаты исследований с целью выявления степени связи заболеваемости профессиональными, производственно обусловленными и хроническими соматическими заболеваниями, а также возникновением медицинских противопоказаний для допуска персонала к работе с уровнем и продолжительностью влияния вредных и (или) опасных производственных факторов радиационной природы, а также иными факторами (стаж работы, возраст, пол и др.).

Литература

1. Tang F, Loganovsky K. Low dose or low dose rate ionizing radiation-induced health effect in the human, *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018; 192: 32–47.
2. Muirhead CR, O'hagan JA, Haylock RGE, Phillipson MA, Willcock T, Berridge GLC, et al. Mortality and cancer incidence following occupational radiation exposure: third analysis of the National Registry for Radiation Workers. *British journal of cancer*. 2009; 100 (1): 206–12.
3. Методические указания МУ 2.6.1.065-2014 «Дозиметрический контроль профессионального внутреннего облучения. Общие требования». Москва, 2014; 46 с. Доступно по ссылке: https://fmba.gov.ru/upload/iblock/dc0/mu_2.6.1.065-2014.pdf.
4. Аклеев А. В., Аладова Е. Е., Анциферов А. Н., и др. Ядерная медицина: справочник для персонала отделений, лабораторий и центров медицины. М.: ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2020; 388 с.
5. Лягинская А. М., Шандала Н. К., Киселев С. М., Ермалицкий А. П., Петоян И. М., Купцов В. В., и др. Состояние здоровья персонала предприятия по обращению с радиоактивными отходами утилизируемого атомного флота СССР. Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2019; 28 (4): 73–87.
6. Методические указания МУ 2.6.5.032-2017 «Контроль радиоактивного загрязнения поверхностей». М., 2017. Доступно по ссылке: <https://docs.cntd.ru/document/456087187>.
7. Методика измерения снимаемой поверхностной активности альфа- и бета- излучающих радионуклидов с использованием носимого или стационарного радиометра, устройства для отбора мазков УОМ-01Т и приспособления для измерения активности радионуклидов в фиксированной геометрии УИМ-01Т, ФГУП НИИ ПММ, номер в Федеральном реестре методик измерений: ФР.1.40.2015.19924, свидетельство об аттестации методики измерений № 451/210-(01.00250-2008)-2013. Доступно по ссылке: <https://docs.cntd.ru/document/437126129>.
8. Руководство Р 2.2.2006-05 Гигиена труда. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда. Бюллетень нормативных и методических документов Госсанэпиднадзора. 2005; 3 (21).
9. Санитарные правила и нормы СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ 99/2009». Доступно по ссылке (дата обращения 25.01.2022): <http://docs.cntd.ru/document/902170553/>.
10. ICRP, Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers, ICRP Publication № 68, Ann. ICRP 24 4. Oxford: Elsevier Science, 1994.
11. ICRP, Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides, Part 5, Compilation of Ingestion and Inhalation Dose Coefficients, ICRP Publication № 72, Ann. ICRP 26. Oxford: Elsevier Science, 1996.
12. Medici S, Carbonez P, Damet J, Bochud F, Bailat C, Pitzschke A, Detecting intake of radionuclides: In vivo screening measurements with conventional radiation protection instruments. *Radiation Measurements*. 2019; 122: 126–32.
13. Medici S, Carbonez P, Damet J, Bochud F, Pitzschke A, Use of portable gamma spectrometers for triage monitoring following the intake of conventional and novel radionuclides. *Radiation Measurements*. 2020; 136: 106426. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2020.106426>.
14. Galeev R, Butterweck G, Boschung M, Hofstetter-Boillat B,

Выводы

1. Условия труда персонала научно-исследовательской организации, работающего с открытыми ИИИ, по характеристикам воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов радиационной природы находятся в диапазоне от допустимых (класс 2) до опасных (класс 4). Соблюдение установленных норм и требований радиационной безопасности не исключает поступление и инкорпорацию радионуклидов в организме работников.

2. Для анализа динамики формирования индивидуальной эффективной дозы внутреннего облучения необходимы проведение регулярных спектрометрических обследований персонала АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина», а также разработка программы проведения скрининговых исследований (с использованием портативных спектрометров) для оценки поступления радионуклидов в организм работников и при установлении факта инкорпорации проведение углубленных спектрометрических исследований на высокоточных спектрометрах излучения человека. Это позволит повысить качество контроля индивидуальных доз внутреннего облучения и эффективность радиационно-гигиенического обеспечения безопасности персонала.

3. Необходимо проведение дальнейших исследований в целях оценки тенденций и выявления степени связи заболеваемости профессиональными, хроническими соматическими заболеваниями, а также возникновения медицинских противопоказаний по допуску к работе персонала научно-исследовательских институтов, работающего с открытыми ИИИ, с уровнем и продолжительностью влияния вредных и (или) опасных производственных факторов радиационной природы и иными факторами.

Hohmann E, Mayer S. Suitability of portable radionuclide identifiers for emergency incorporation monitoring. *Radiation Protection Dosimetry*. 2017; 173 (1–3): 145–50. Available from: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncw330>.

15. Арефьева Д. В., Петушок А. В., Шаяхметова А. А., авторы; Федеральное государственное унитарное предприятие научно-исследовательский институт промышленной и

морской медицины Федерального медико-биологического агентства, Медико-дозиметрический регистр персонала группы А Акционерного общества «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина», работающего с открытыми источниками ионизирующих излучений: Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021620928 Российская Федерация, 05.05.2021.

References

- Tang F, Loganovsky K. Low dose or low dose rate ionizing radiation-induced health effect in the human, *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018; 192: 32–47.
- Muirhead CR, O'hagan JA, Haylock RGE, Phillipson MA, Willcock T, Berridge GLC, et al. Mortality and cancer incidence following occupational radiation exposure: third analysis of the National Registry for Radiation Workers. *British journal of cancer*. 2009; 100 (1): 206–12.
- Metodicheskie ukazaniya MU 2.6.1.065-2014 «Dozimetriceskij kontrol' professional'nogo vnutrennego obluchenija. Obshhie trebovaniya». Moskva, 2014; 46 s. Dostupno po sсылке: https://fmba.gov.ru/upload/iblock/dc0/mu_2.6.1.065-2014.pdf. Russian.
- Akleev AV, Aladova EE, Anciferov AN, i dr. *Jadernaja medicina: spravocnik dlja personala otdelenij, laboratorij i centrov mediciny*. M.: FGBU GNC FMBC im. A.I. Burnazjana FMBA Rossii, 2020; 388 s. Russian.
- Ljaginskaja AM, Shandala NK, Kiselev SM, Emalickij AP, Petojan IM, Kupcov VV, i dr. Sostojanie zdorov'ja personala predprijatija po obrashheniju s radioaktivnymi othodami utiliziruemogo atomnogo flota SSSR. *Radiacija i risk (Bjul'ten' Nacional'nogo radiacionno-jepidemiologičeskogo registra)*. 2019; 28 (4): 73–87. Russian.
- Metodicheskie ukazaniya MU 2.6.5.032-2017 «Kontrol' radioaktivnogo zagrijaznenija poverhnostej». M., 2017. Dostupno po sсылке: <https://docs.cntd.ru/document/456087187>. Russian.
- Metodika izmerenija snimaemoj poverhnostnoj aktivnosti al'fa- i beta- izluchajushhijh radionuklidov s ispol'zovaniem nosimogo ili stacionarnogo radiometra, ustrojstva dlja otbora mazkov UOM-01T i prisposoblenija dlja izmerenija aktivnosti radionuklidov v fiksirovannoj geometrii UIM-01T, FGUP NII PMM, nomer v Federal'nom reestre metodik izmerenij: FR.1.40.2015.19924, svidetel'stvo ob attestacii metodiki izmerenij # 451/210-(01.00250-2008)-2013. Dostupno po sсылке: <https://docs.cntd.ru/document/437126129>. Russian.
- Rukovodstvo R 2.2.2006-05 *Gigiena truda. Rukovodstvo po higieničeskoij ocenke faktorov rabochej sredy i trudovogo* processa. Kriterii i klassifikacija uslovij truda. Bjul'ten' normativnyh i metodičeskijh dokumentov Gossanjepidnadzora. 2005; 3 (21). Russian.
- Sanitarnye pravila i normativy SanPIN 2.6.1.2523-09 «Normy radiacionnoj bezopasnosti NRB 99/2009». Dostupno po sсылке (data obrashhenija 25.01.2022): <http://docs.cntd.ru/document/902170553/>. Russian.
- ICRP, Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers, ICRP Publication № 68, Ann. ICRP 24 4. Oxford: Elsevier Science, 1994.
- ICRP, Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides, Part 5, Compilation of Ingestion and Inhalation Dose Coefficients, ICRP Publication № 72, Ann. ICRP 26. Oxford: Elsevier Science, 1996.
- Medici S, Carbonez P, Damet J, Bochud F, Bailat C, Pitzschke A, Detecting intake of radionuclides: In vivo screening measurements with conventional radiation protection instruments. *Radiation Measurements*. 2019; 122: 126–32.
- Medici S, Carbonez P, Damet J, Bochud F, Pitzschke A, Use of portable gamma spectrometers for triage monitoring following the intake of conventional and novel radionuclides. *Radiation Measurements*. 2020; 136: 106426. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2020.106426>.
- Galeev R, Butterweck G, Boschung M, Hofstetter-Boillat B, Hohmann E, Mayer S. Suitability of portable radionuclide identifiers for emergency incorporation monitoring. *Radiation Protection Dosimetry*. 2017; 173 (1–3): 145–50. Available from: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncw330>.
- Arefeva DV, Petushok AV, Shajahmetova AA, avtory; Federal'noe gosudarstvennoe unitarnoe predprijatie nauchno-issledovatel'skij institut promyshlennoj i morskoi mediciny Federal'nogo mediko-biologičeskogo agentstva, Mediko-dozimetriceskij registr personala grupy A Akcionernogo obshhestva «Radievij institut im. V.G. Hlopina», rabotajushhego s otkrytymi istochnikami ionizirujushhijh izluchenij: Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii bazy dannyh # 2021620928 Rossijskaja Federacija, 05.05.2021. Russian.