

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2020

Охрименко С.Е.^{1,2}, Коренков И.П.¹, Прохоров Н.И.³, Шандала Н.К.¹, Захарова А.В.³

Радиационно-гигиеническая оценка современных медицинских технологий

¹ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства», 123098, Москва;

²ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Министерства здравоохранения Российской Федерации, 125993, Москва;

³ФГАОУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский университет)», 119435, Москва

Введение. В настоящее время современные медицинские радиационные технологии, в том числе с применением радиофармпрепаратов, находят всё более широкое применение. При этом нужно отметить, что сами эти технологии претерпели существенную эволюцию в сторону повышения их радиационной безопасности. Но если радиационные технологии неуклонно совершенствовались, то подходы в области контроля и регулирования деятельности с источниками ионизирующих излучений сохраняют высокую степень консерватизма. В правоприменительной практике такой подход приводит всё в большей и в большей степени к избыточным требованиям, не оправданным с точки зрения основных принципов обеспечения радиационной безопасности – нормирования, обоснования, оптимизации. В данной работе обоснованы пути совершенствования вопросов нормирования и регулирования деятельности при эксплуатации источников ионизирующего излучения.

Цель исследования – проведение радиационно-гигиенической оценки условий труда в ПЭТ-центрах и разработка предложений по совершенствованию регулирующих требований с учётом особенностей современных технологий.

Материал и методы. Использованы протоколы производственного радиационного контроля, результаты собственных исследований эффективных эквивалентных доз, эквивалентных доз кожи и хрусталика глаза методом термолюминесцентной дозиметрии, хронометраж рабочего времени персонала ПЭТ-центра.

Результаты. В рамках работы проведён анализ результатов производственного радиационного контроля ПЭТ-центра крупной медицинской организации. Показано, что годовые дозы облучения находятся в пределах не более 1/3 предела дозы у незначительного количества персонала, большинство которого получает менее 5 мЗв/год. Данные собственных исследований, выполненные на базе научной ЛРК кафедры радиохимии МГУ им. М.В. Ломоносова, хорошо согласуются с данными медицинской организации. Проведение хронометражных исследований позволило сделать вывод о том, что время непосредственного облучения персонала значительно меньше стандартных значений, предусмотренных нормативными документами, а мощности дозы при ряде операций не могут соответствовать величинам, регламентированным этими документами. Показано, как фактически безопасная технология может относиться, по формальным признакам, к «высокоопасной», что и является существенным противоречием в области регулирования деятельности с радиационными источниками.

Заключение. Важным фактором обеспечения РБ является выявление критических групп персонала, наиболее облучаемых органов и тканей с учётом потребляемой годовой активности. Заложенные в нормативных документах стандартизированные критерии мощности дозы не предусматривают использование показателей фактической рабочей нагрузки (времени облучения). Необходимо внесение соответствующих изменений в нормативные документы.

К л ю ч е в ы е с л о в а : радиационные технологии; источник ионизирующего излучения; ПЭТ-центр; радиофармпрепарат; ПЭТ-КТ; изотопная лаборатория; медицинская сестра; фасовщик; рентгенлаборант; эффективная доза; эквивалентная доза; хронометраж; кожа; хрусталик глаза; радиофармпрепарат; радиационная безопасность.

Для цитирования: Охрименко С.Е., Коренков И.П., Прохоров Н.И., Шандала Н.К., Захарова А.В. Радиационно-гигиеническая оценка современных медицинских технологий. Гигиена и санитария. 2020; 99 (9): 939-946. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-9-939-946>

Для корреспонденции: Охрименко Сергей Евгеньевич, канд. мед. наук, докторант ГНЦ РФ ФГБУ «Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна» ФМБА России, Москва. E-mail: ooniii@mail.ru

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов: концепция и дизайн исследования – Охрименко С.Е., Коренков И.П., Прохоров Н.И., Шандала Н.К.; сбор и обработка материала – Охрименко С.Е., Захарова А.В.; статистическая обработка – Охрименко С.Е., Захарова А.В.; написание текста – Охрименко С.Е., Захарова А.В.; редактирование – Коренков И.П., Шандала Н.К.; утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи – все соавторы.

Поступила 16.05.2020

Принята к печати 18.09.2020

Опубликована 20.10.2020

Sergei E. Okhrimenko^{1,2}, Igor P. Korenkov¹, Nikolai I. Prohorov³, Natalya K. Shandala¹, Anastasiya V. Zakharova³
Radiation-hygienic assessment of modern medical technologies¹A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Centre, Moscow, 123182, Russian Federation;²Russian Medical Academy of Continuing Postgraduate Education Russian, Moscow, 125993, Russian Federation;³I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, 119435, Russian Federation;

Introduction. Currently, modern medical radiation technologies, including the use of radiopharmaceuticals, are becoming more widely used. At the same time, it should be noted that these technologies themselves have undergone a significant evolution towards improving their radiation safety. But while radiation technologies have been steadily improving, approaches to controlling and regulating activities with ionizing radiation sources remain highly conservative. In law enforcement practice, this approach leads more and more to excessive requirements that are not justified for the basic principles of radiation safety – rationing, justification, optimization. This paper substantiates the ways to improve the issues of regulation and regulation of activities using modern radiation technologies

Purpose of research. Conducting radiation and hygiene assessment of working conditions in PET centers and developing proposals for improving regulatory requirements, taking into account the features of modern technologies

Material and methods. Protocols of industrial radiation control, results of own research of effective equivalent doses, equivalent doses for the skin and lens of the eye by thermoluminescent dosimetry, timekeeping of the working time of the PET center staff were used.

Results. As part of the work, the results of industrial radiation monitoring of the PET- center of a large medical organization were analyzed. It is shown that the annual radiation doses are within no more than 1/3 of the dose limit for limited personnel, most of whom receive less than 5 mSv per year. The data of our research carried out based on the scientific LRC of the Department of radiochemistry of the Lomonosov Moscow State University are in good agreement with the data of the medical institution. Conducting time-lapse studies allowed us to conclude that the time of direct exposure of personnel is significantly less than the standard values provided for by regulatory documents, and the dose rates for many operations can not correspond to the values regulated by these documents. It is shown how a safe technology can relate, on formal grounds, to “highly dangerous”, which is a significant modern contradiction in the field of regulating activities with radiation sources.

Conclusion. An important factor in ensuring radiation safety is the identification of critical groups of personnel, the most exposed organs, and tissues, taking into account the annual activity consumed. The standardized dose rate criteria laid down in regulatory documents do not provide for the use of indicators of the actual workload (time of exposure). It is necessary to introduce appropriate changes to the normative documents.

Key words: radiation technologies; ionizing radiation source; PET- center; PET-CT; isotope laboratory; nurse; packer; x-ray lab; effective dose; equivalent dose; timing; skin; eye lens; radiation safety; radiopharmaceutical.

For citation: Okhrimenko S.E., Korenkov I.P., Prokhorov N.I., Shandala N.K., Zakharova A.V. Radiation-hygienic assessment of modern medical technologies. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2020; 99 (9): 939-946. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-9-939-946> (In Russ.)

For correspondence: Sergei E. Okhrimenko, MD, Ph.D., Ass. Prof, Russian Medical Academy of Continuing Postgraduate Education, Moscow, 125993, Russian Federation. E-mail: ooniii@mail.ru

Information about the authors:

Okhrimenko S.E., <https://orcid.org/0000-0002-8282-1798>; Korenkov I.P., <https://orcid.org/0000-0002-5709-0858>; Prohorov N.I., <https://orcid.org/0000-0002-4510-2890>; Zakharova A.V., <https://orcid.org/0000-0002-4815-8830>; Shandala N.K., <https://orcid.org/0000-0003-1290-3082>

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgment. The study had no sponsorship

Contribution: Okhrimenko S.E. – concept and design of the study, collection and processing of material, statistical processing, writing text. Korenkov I.P. – concept and design of the study, editing. Prokhorov N.I. – concept and design of the study. Shandala N.K. – concept and design of the study, editing. Zakharova A.V. – collection and processing of material, statistical processing, writing text. All co-authors – approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Received: May 16, 2020

Accepted: September 18, 2020

Published: October 20, 2020

Введение

С момента открытия явления радиоактивности и до её внедрения в практику прошло очень немного времени. В начале XX века изотопами радия лечили, а «X-лучами» просвечивали пациентов. Также стала очевидна высокая степень опасности источников ионизирующего излучения (ИИИ) [1–3]. На этой основе разрабатывались и по сей день разрабатываются нормативные и регулирующие документы в области использования ионизирующих излучений. Но с тех пор прошло много времени, и технологии очень сильно изменились в сторону их более высокой степени безопасности, даже с учётом имевших место радиационных аварий и загрязнения окружающей среды [4–6]. Но подходы остались прежние, а концепция-гипотеза [1] беспорогового действия малых доз только усилила опасения, несмотря на радикальное снижение количества тяжёлых лучевых поражений, по количеству которых в нашей стране радиацию можно отнести далеко не к самым опасным факторам [7].

Современная диагностика в существенной степени основана на радиационных методах исследования. К одной

из таких современных технологий относится позитронно-эмиссионная, совмещённая с компьютерной томографией диагностика (ПЭТ-КТ). В основе метода лежит использование ядерной реакции, в результате которой образуются диагностические ультракороткоживущие изотопы (¹⁸F, ¹¹C, ¹³N, ¹⁵O), и на их основе синтезируются соответствующие радиофармпрепараты. Безусловно, данная технология относится к отрасли ядерной медицины, а по дозам облучения пациентов – к «высокодозовой». Только за счёт воздействия радиофармпрепарата (РФП) эффективные дозы (Е) составляют 2–7 мЗв за процедуру. Эффективные дозы пациентов при основных диагностических процедурах приведены в табл. 1 [8].

Наиболее распространённым видом ПЭТ-исследования в России является исследование всего тела с введением пациенту ¹⁸F-ФДГ. Форма распределения отделений ПЭТ по стандартным активностям ¹⁸F-ФДГ и дозам внутреннего облучения отлична от нормального, у распределения есть два максимума (бимодальное распределение) при вводимых активностях 240 и 340 МБк, что соответствует дозам 4 и 6 мЗв. Наличие двух выделенных пиков демонстрирует наличие двух различных методик проведения исследований, исполь-

Таблица 1

Эффективные дозы пациентов за счёт основных диагностических исследований

Вид ПЭТ-исследования, РФП	Число ПЭТ-отделений	Стандартные активности, среднее и диапазон, МБк	Стандартные эффективные дозы, среднее и диапазон, мЗв
Головной мозг с ^{18}F -ФДГ	5	170 (120–200)	3 (2–4)
Головной мозг с ^{18}F -тирозин	2	200 (200–200)	3 (3–3)
Головной мозг с ^{18}F -холин	2	190 (175–225)	4 (4–5)
Головной мозг с ^{11}C -метионин	4	280 (250–450)	2 (2–4)
Всё тело с ^{18}F -ФДГ	19	280 (200–390)	5 (4–7)
Всё тело или таз с ^{18}F -холин	3	310 (225–350)	6 (5–7)
Всё тело или таз с ^{11}C -холин	2	380 (210–550)	2 (1–2)
Перфузия миокарда с ^{13}N -аммоний	2	775 (750–800)	2 (2–2)
Всё тело с ^{68}Ga -PSMA	1	105	2
Всё тело с ^{68}Ga -DOTA-TATE/ ^{68}Ga -DOTA-NOC	1	105	2

зюемых в практике разных отделений ПЭТ-диагностики в России. Но гораздо большая доза формируется за счёт КТ-сканирования. Значения DLP и эффективных доз облучения пациентов приведены в табл. 2 [8].

Чаще всего в ПЭТ/КТ-диагностике применяют протокол сканирования всего тела, которое выполняют при среднем значении стандартных DLP 800 мГр·см, что формирует сред-

Таблица 2

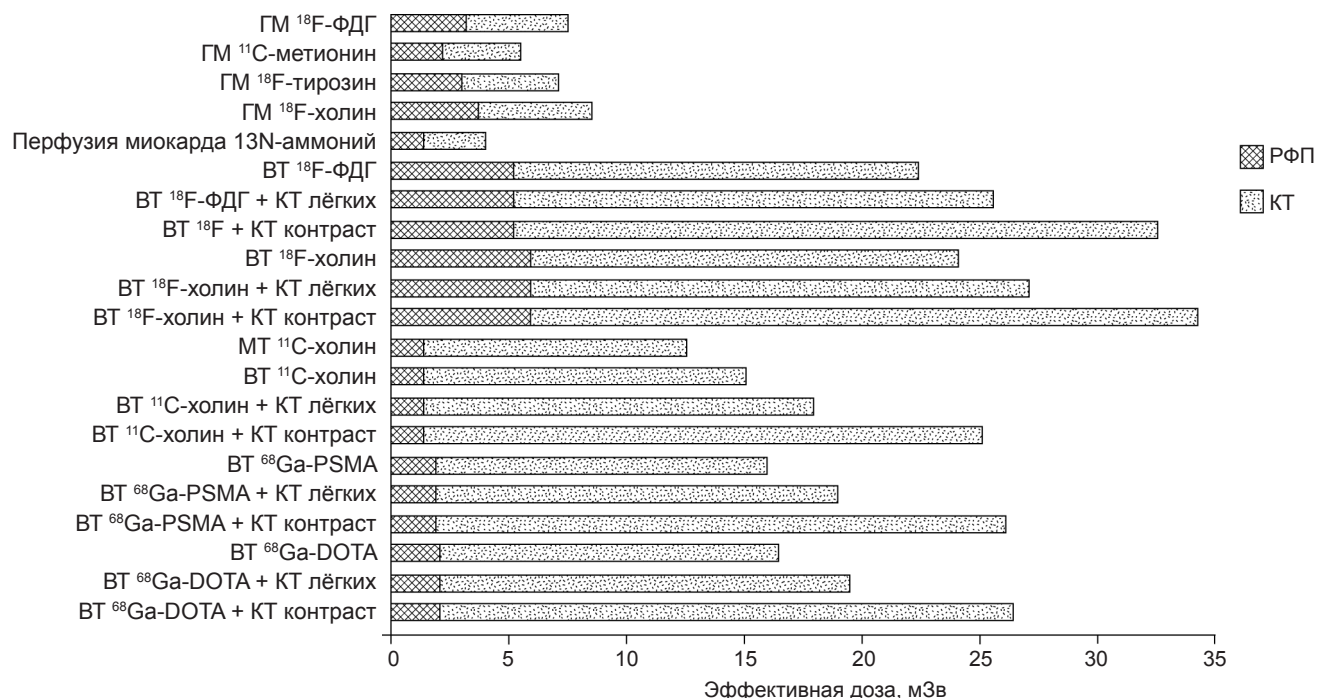
Зоны КТ-сканирования, стандартные DLP, мГр·см, и эффективные дозы внешнего облучения пациентов, мЗв

Зона КТ-сканирования	Число ПЭТ-аппаратов	Стандартные DLP, среднее и диапазон, мГр·см	Стандартные дозы, среднее и диапазон, мЗв
Всё тело	22	800 (400–1700)	12 (6–26)
Всё тело + грудная клетка	4	1000 (830–1100)	15 (12–17)
Всё тело с контрастом	10	1500 (1300–2400)	23 (20–36)
Голова	18	440 (40–1700)	1 (0,1–2)
Грудная клетка (зона сердца)	3	70 (50–100)	1 (1–1)
Малый таз	2	500	8 (8–8)

нюю дозу пациента 12 мЗв. Соотношение Е за счёт РФП и КТ исследований представлены ниже (см. рисунок) [8].

Дозам облучения пациентов при ПЭТ-КТ исследованиях в отечественной литературе посвящено большое количество трудов [9–21]. Ядерный характер технологии [22] в сочетании с большими дозами на пациентов создали ПЭТ-КТ ореол «опасной технологии» с вытекающими отсюда последствиями в области регулирования. Однако при внимательном рассмотрении ПЭТ-центры либо незначительно, либо вовсе не воздействуют на окружающую среду и население, а облучение персонала крайне невелико, что подтверждается целым рядом работ [23–26, 32].

В рамках настоящего исследования проведена радиационно-гигиеническая оценка условий труда персонала различных подразделений ПЭТ-центра крупного московского медицинского учреждения. Авторы ставили перед



Средние значения эффективной дозы (мЗв) внутреннего (РФП) и внешнего (КТ) облучения пациентов в результате ПЭТ/КТ-исследований головного мозга (ГМ), малого таза (МТ), всего тела (ВТ), миокарда.

собой задачу комплексной оценки доз облучения персонала ПЭТ-центра с разработкой предложений по совершенствованию регулирующих требований при работе с медицинскими ИИИ [27, 28].

Материал и методы

Для измерения уровней мощности амбиентного эквивалента дозы внешнего гамма-излучения применяли дозиметр гамма-рентгеновского излучения ДКС АТ-1123: диапазон энергий 0,015–3 МэВ, диапазон МАЭД – 0,05 мкЗв/ч – 10 Зв/ч, погрешность измерений $\pm 15\%$. Для оценки индивидуальных эффективных доз облучения персонала применяли дозиметры индивидуального эквивалента дозы Нр(10) с детекторами: ДТГ-4 (производство Ангарского филиала ООО «Уралприбор») на основе монокристаллического LiF (Mg, Ti), диапазон измерений 20 мкЗв – 10 Зв для энергий 0,015–10 МэВ, основная погрешность измерения с доверительной вероятностью 0,95 не хуже $\pm 5\%$; ТЛД-1011 (производства НТЦ «Практика») на основе поликристаллического LiF (Cu, Mg, P), диапазон измерений 5 мкЗв – 12 Зв для энергий 0,015–10 МэВ. Основная погрешность измерения с доверительной вероятностью 0,95 не хуже $\pm 7\%$. Для оценки эквивалентных доз кожи и хрусталика глаз применяли дозиметры индивидуального эквивалента дозы Нр(0,07) и Нр(3) соответственно с чувствительным элементом (детектором) ТЛД-1011 (Т) (производства НТЦ «Практика»). Данные детекторы представляют собой слой поликристаллического термолуминофора LiF (Cu, Mg, P) с массовой толщиной $5 \pm 0,1$ мг/см², нанесённый на алюминиевую подложку ($21 \pm 0,1$ мг/см²). Диапазон измерений 30 мкЗв – 12 Зв для энергий 0,005–10 МэВ. Основная погрешность измерения с доверительной вероятностью 0,95 не хуже $\pm 10\%$. При проведении измерений проводили индивидуальную калибровку детекторов. Для калибровки был использован источник гамма-излучения Cs-137 ($E_\gamma = 661$ кэВ) тип Ц2-5. Измерения детекторов производили на термолуминоцентном анализаторе «HARSHAW» TLD system 4000; Thermo Scientific Ltd. «Лаборатории радиационного контроля» кафедры радиохимии МГУ им. М.В. Ломоносова.

Результаты

Исследуемый ПЭТ-центр крупного московского медицинского центра расположен на «-2-м» этаже отдельно стоящего здания. Имеет в своём составе: циклотрон-протонный ускоритель 15 МэВ, радиохимический комплекс, контрольные лаборатории, участок подготовки РФП к транспортировке, изотопную диагностическую лабораторию (фасовочная, процедурная, релаксационная для выдержки пациентов с активностью), комната управления, процедурная ПЭТ-КТ.

Технология работ состоит из следующих основных этапов:

- наработка исходного радионуклида в протонном ускорителе (¹⁸F);
- синтез радиофармпрепаратов в автоматических модулях;
- доставка в подразделение фасовки;
- передача образцов в лаборатории контроля качества;
- фасовка РФП и передача в процедурную;
- введение РФП пациентам;
- нахождение пациентов с РФП в помещении ожидания;
- проведение исследования на ПЭТ-КТ.

Рабочие места имеются в подразделениях: управления циклотроном, лаборатории синтеза, контрольных лабораторий, фасовочной, процедурной, кабинета ПЭТ-КТ, в подразделении фасовки. В условиях облучения в течение большей части смены находится персонал радиохимической лаборатории, контрольных лабораторий, фасовочной – процедурной и кабинета ПЭТ-КТ. Персонал, обеспечивающий

обслуживание циклотрона, передачу радиофармпрепарата (РФП) в фасовочную, имеет наименьшее время облучения.

Поскольку мы предполагали, что наибольшее время облучения связано с участками фасовки, введения РФП и процедуры сканирования, на первом этапе экспериментальных исследований нами проводилась оценка радиационно-гигиенических условий труда в подразделениях фасовочной – процедурной и участка сканирования. В работе ПЭТ-КТ лаборатории принимают участие три сотрудника: «медицинская сестра» («А»), «фасовщик» («Б»), «рентгенолаборант» («С»). В рамках данной организации конкретные сотрудники могут как заменять друг друга, так и в течение года выполнять работу в другой лаборатории ПЭТ-КТ, имеющейся в организации.

Хронометраж рабочего времени процедуры фасовки РФП. Флакон с ¹⁸F с исходной $A_{\text{флакон}} = 1$ Гбк поступает из подразделения синтеза в специальном контейнере и загружается в защитный шкаф, оборудованный специальной вытяжной вентиляцией. Подготовка шприца для пациента ($A_{\text{ср шприц}} = 383$ МБк) осуществляется только после поступления информации о подготовке нового пациента. Фасовщик осуществляет операцию в защитном вытяжном шкафу: вскрывает шприц, вскрывает флакон, набирает РФП в шприц и измеряет его активность на дозколитраторе. После этого шприц упаковывают в вольфрамовую защиту (2,5 мм), после чего помещают в стальную коробку с крышкой и ручкой, длиной около 30 см, в которой транспортируется к месту введения (помещение релаксационной, где уже находится пациент с введённым в кубитальную вену катетером, расстояние перемещения около 10–15 м). Медсестра забирает шприц в защите, осуществляет введение и возвращает шприц фасовщику. Последний уносит шприц в фасовочную, разбирает его на части и утилизирует компоненты (коробочка в защитном вытяжном шкафу). При этом вольфрамовая защита используется многократно (1 защита на 4–5 пациентов). Максимальная пропускная способность данной лаборатории – до 26 пациентов. Рабочая смена длится с 7 до 21 ч (14 ч). Бюджет времени контакта фасовщика с активностью складывается из процесса собственно фасовки, доставки, ожидания, возврата. Наиболее облучательная фаза (фасовка) занимает от 1 мин 20 с до 1 мин 45 с. Общее время облучения с учётом последующих операций – 2–3 мин.

Хронометраж работы медицинской сестры. Работа медицинской сестры заключается в приглашении пациента на обследование, регистрации (внесение в базу данных, аллергоанамнез, оценка уровня глюкозы, масса тела, рост для оценки необходимой активности РФП, питание в день обследования), установка внутривенного катетера, введение РФП, контроль за состоянием пациента в зоне ожидания («релаксационной»). Подготовительные работы осуществляют в помещении процедурной, после чего пациента препровождают в 1 из 4 релаксационных ниш (без двери), где ему устанавливают катетер и в дальнейшем вводят РФП. После установки катетера медицинская сестра сообщает об этом в фасовочную, где уже по результатам регистрации подготовлен шприц с требуемой активностью (370–380 МБк). Шприц переносится фасовщиком из фасовочной в специальном стальном контейнере с ручкой до 30 см и шприцем в вольфрамовой защите в нишу с пациентом. Там медицинская сестра освобождает шприц от иглы и вводит РФП через катетер, после чего также промывает катетер физраствором из заранее подготовленного шприца. После проведения инъекции фасовщик, также в стальном контейнере, уносит шприц в отходы. Вольфрамовая защита шприца стерилизуется в специальном растворе перед инъекциями, а потом используется для 4–5 инъекций. Медицинская сестра обустраивает пациента, интубирует, проверяет других пациентов (максимальное число пациентов с активностью – 4), после чего выходит из зоны, забирая отходы и закрывая за собой стеклянную дверь

Таблица 3

Оценка мощности амбиентного эквивалента дозы от шприца в вольфрамовой (W) защите марки «КС 223 А» толщиной 2,5 мм с ^{18}F с А = 383 МБк и $^{99\text{m}}\text{Tc}$, А = 440 МБк

Изотоп	Мощность дозы, мкЗв/ч	
	без W защиты	в W защите
^{18}F	62	11,6
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	31	0,54

(около 2 см стекла). Между инъекциями она периодически проверяет пациентов, которых может быть от 1 до 4 человек. В среднем пациенты поступают на обследование каждые 15–30 мин. В день проведения хронометража были запланированы 26 пациентов на ПЭТ-КТ-обследование, что близко к максимуму.

Радиационные характеристики процессов. Наиболее значимое облучение получает медицинская сестра в период введения РФП (^{18}F). Мощность экспозиционной дозы в зависимости от расстояния может составлять на уровне «левый локоть – пояс» от 60–70 до 100 мкЗв/ч и более, что зависит от положения тела, находящегося в динамическом режиме. Вместе с тем сама процедура длится в среднем 30–40 с. Все постинъекционные мероприятия проводятся на гораздо больших расстояниях от пациентов, являющихся источниками излучения. Так, в период обслуживания мощность дозы у тела медсестры за счёт «активных» пациентов колебалась в широких пределах 0,5–20 мкЗв/ч. За 14 ч смены прошло 25 пациентов. Общая активность ^{18}F 9676 МБк или 387 МБк на одного пациента. Общее время нахождения медицинской сестры в зоне облучения – 2 ч. Непосредственно введение заняло 13 мин, если считать на максимально возможное количество для данной лаборатории – 26 пациентов. Приблизительная оценка вклада процедуры инъекции в годовую дозу составила около 3–3,5 мЗв. Годовая эффективная доза ($E_{\text{эфф}}$), по данным индивидуального дозиметрического контроля за 2018 г., составила 6,3 мЗв (грудь) и 3,4 (таз) или по 4,2 мкЗв на 1 ГБк. Но надо иметь в виду, что в данной лаборатории фасовщик и медицинская сестра в ходе 14-часовой смены меняются между собой (для смены алгоритма действий и снижения утомляемости, связанной с монотонией). При этом разделение функций носит случайный и неравномерный характер. В ходе работы отмечается различное поведение сотрудников, связанное с частотой и расстоянием при контакте с «активными» пациентами. Так, медицинская сестра «А» чаще контактировала с пациентами в течение смены, чем фасовщик «Б», в период их нахождения у пациентов в помещении ожидания. По данным производственного ИДК за 2019 г. $E_{\text{эфф}}$ составили: для медицинской сестры «А» – 12,9 мЗв, для фасовщика «Б» – 4,8 мЗв. Повышенная доза облучения медицинской сестры в 2019 г. по отношению к 2018 г. обусловлена участием в работе имеющегося в организации второго ПЭТ-КТ блока.

Таблица 5

Дозы облучения хрусталика глаза и кожи рук у персонала ПЭТ-КТ-отделения (собственные исследования)

Сотрудник	Операция	А, ГБк	Количество пациентов	H_{skin} , мЗв	H_{lens} , мЗв
А	Введение преобладает над фасовкой	109,2	283	20,0	0,63
В	Фасовка преобладает над введением	124,5	324	12	0,67
С	ПЭТ-КТ, сканирование	135,2	354	2,2	0,8

В рамках настоящей работы проведена оценка защитных свойств 2,5-мм вольфрамового контейнера, в котором шприц транспортируется из фасовочной в процедурное помещение. Проведено сравнение защитных свойств контейнера при использовании ^{18}F с активностью 383 МБк и $^{99\text{m}}\text{Tc}$, с активностью 440 МБк. Результаты приведены в табл. 3.

Как видно, наиболее эффективной защита является при использовании $^{99\text{m}}\text{Tc}$, о чём персонал, работающий с ^{18}F , не знал и не учитывал это обстоятельство в должной степени при его транспортировке, не учитывая защиту расстоянием, предполагая гораздо большую эффективность вольфрамовой защиты.

Хронометраж рабочего времени рентгенолаборанта ПЭТ-КТ. Рентгенолаборант ПЭТ-КТ («С») осуществляет приглашение пациента после накопления РФП (50 мин) в процедурную ПЭТ-КТ через специальный вход. Осуществляет укладку и инструктаж пациента с активностью около 380–387 МБк ^{18}F , после чего осуществляет сканирование из пультавой. В ходе проведения обследования он заходит в процедурную для подготовки пациента к введению контрастного вещества. После завершения сканирования помогает последнему сойти со стола ПЭТ-КТ и провожает в кабинет ожидания результатов. Общее время контакта рентгенолаборанта с «активным» пациентом составляет 7–8 мин. Среднее количество пациентов в смену (14 ч) – 22. Максимальное – 26. По данным производственного радиационного контроля за 2019 г. $E_{\text{эфф}}$ составила 6,8 мЗв.

С целью уточнения данных производственного контроля нами проведена экспозиция собственных индивидуальных дозиметров (на базе Научной ЛРК кафедры радиохимии МГУ им. М.В. Ломоносова) у сотрудников «А», «В», «С». В корпусах дозиметров (Hr10) были размещены детекторы 2 типов: ТЛД-1011 (разработка кафедры радиохимии, аттестованы в 1995 г.) и ДТГ-4 (наиболее широко распространённых на территории России). Указанные дозиметры экспонировались в течение 5 рабочих смен. Радиационные характеристики («рабочая нагрузка») на каждого сотрудника приведены в табл. 4.

Также нами проведены исследования эквивалентных доз на хрусталик глаза и кожу рук при манипуляциях персонала лаборатории ПЭТ-КТ (сотрудники А, В, С), данные приведены в табл. 5.

Таблица 4

Распределение «рабочей нагрузки» и доз облучения ($E_{\text{эфф}}$) сотрудников ПЭТ-КТ лаборатории за пять рабочих смен с перерасчётом на 45 рабочих недель и данные индивидуального дозиметрического контроля за 2019 г. (собственные исследования)

Сотрудник	Операция	ΣA , МБк	$A_{\text{ср}}$, МБк	Количество пациентов	$E_{\text{эфф}}$ (5 смен), мЗв		$E_{45\text{нед}}$, мЗв		$E_{\text{эфф}}$, 2019 ДТГ-4, мЗв
					ТЛД-1011	ДТГ-4	ТЛД-1011	ДТГ-4	
А	Введение/фасовка	30 097	350	86	0,2	0,2	6,3	5,7	12,9/8,2*
Б	Введение/фасовка	31 109	354	88	0,2	0,2	5,2	5,1	4,8
С	Сканирование	34 930	363	75	0,3	0,3	7,6	7,	6,8

Примечание. * – Нижняя часть живота у женщин до 40 лет, также отмечено, что в 2019 г. повысилась нагрузка по сравнению с 2018 г., когда дозы составили при 26 пациентах в смену 6,3 и 3,5 мЗв за год соответственно, что связано с увеличением рабочей нагрузки за счёт совмещения во второй лаборатории.

Мощность эквивалентной дозы, используемой при проектировании защиты от внешнего ионизирующего излучения, с учётом коэффициента запаса 2 [33]

Категория облучаемых лиц	Назначение помещений и территорий	Время облучения, ч/год	Мощность эквивалентной дозы, мкЗв/ч	
			проектная	допустимая*
Персонал:				
группа А	Помещения постоянного пребывания персонала	1700	6,0	12
	Помещения временного пребывания персонала	850	12	24
группа Б	Помещения радиационного объекта и территория санитарно-защитной зоны, где находится персонал	2000	1,2	2,4
	Любые другие помещения и территории	8800	0,06	0,06

Примечание. * – Допустимая мощность дозы в данной таблице ОСПОРБ-99/2010 не приводится и дана дополнительно, чтобы не приводить указанный показатель в отдельной таблице.

Выявление наиболее облучаемых групп персонала, наиболее облучаемых органов и тканей является главной задачей системы радиационной безопасности.

Предварительные расчётные оценки годовых эквивалентных доз обучения сотрудников, приведённые к 11 рабочим месяцам, дали следующие результаты.

По коже (средний палец):

А (введение ≈ 60%, фасовка 40%) – 220 мЗв;

В (фасовка ≈ 60%, введение 40%) – 132 мЗв;

С (рентгенлаборант ПЭТ-КТ) – 24 мЗв.

По хрусталику глаза:

А (введение ≈ 60%, фасовка 40%) – 6,9 мЗв;

В (фасовка ≈ 60%, введение 40%) – 7,4 мЗв;

С (рентгенолаборант ПЭТ-КТ) – 8,8 мЗв.

По представленным данным преждевременно делать вывод об уровне облучения кожи и хрусталика в силу недостаточной статистики. Однако необходимо считать полученные результаты значимыми, поскольку они составляют существенную долю нормируемого показателя (500 мЗв для кожи и 20 мЗв для хрусталика глаза), а облучение хрусталика уже рассматривается рядом авторов как стохастическое [29–32]. Сотрудники других подразделений ПЭТ-центра: циклотронный комплекс, радиохимического синтеза, транспортировки, контрольной лаборатории имеют существенно меньший бюджет времени по непосредственному контакту с источником. Их рабочая нагрузка и годовые дозы приведены ниже.

Циклотронная группа. Выполняет управление работой циклотрона и его текущее обслуживание, которое заключается в выполнении ряда операций (обследование мишеней через 2 мес после облучения – 2 ч, обследование активной мишени – 30 мин, замена линий передачи активного материала, замена клапанов – 2 ч, замена облучённой фольги – 20 мин). По данным производственного ИДК за 2019 г., $E_{эфф}$ годовые сотрудников ЦРК составили 3,5 и 3,6 мЗв соответственно.

Отделение синтеза РФП. Выполняет обслуживание и контроль работы шкафов синтеза РФП. Состав 3 человека. По данным производственного ИДК за 2019 г., $E_{эфф}$ 3 сотрудников (2 женщины) отделения синтеза составили 1,9/19; 1,9/1,8 и лаборант выгрузки контейнеров – 1,9 мЗв соответственно.

Лаборатория контроля качества. Выполняет контроль качества партий РФП, выходящих из отделения синтеза. В лабораторию для исследования отбирается до 7–7,5 Гбк за смену (2 цикла), но непосредственно для проведения исследований используется лишь незначительная часть от общей активности. По данным производственного ИДК за 2019 г., $E_{эфф}$ 3 сотрудников контрольной лаборатории составили 2,3; 3,6 и 1,4 мЗв соответственно.

Как видно, дозы персонала в 2–10 раз ниже регламентированных пределов доз, существенно определяются уровнем

используемых технологий и прямо зависят от непосредственно используемой (проходящей через руки персонала) годовой активности.

Обсуждение

Из представленных результатов можно видеть следующее. Во-первых, организация процессов, заложенная в технологии (наработка, транспортировка, синтез РФП, условия передачи и временного хранения), уже в значительной степени обеспечивает состояние радиационной безопасности. Во-вторых, время контакта персонала с источником и нахождение его в зоне облучения незначительно. В нашем случае доза облучения медицинской сестры А существенно различалась в 2018 и 2019 гг. (6,3 против 12,9 мЗв), что связано с участием данного работника в деятельности и второй лаборатории ПЭТ-КТ, открытой в 2019 г. в связи с увеличивающимся потоком пациентов. Из этого следует, что основным фактором, определяющим дозовую нагрузку, является годовая активность, с которой контактирует персонал. В-третьих, анализ требований нормативных документов, которые дополнительно необходимо осуществить относительно мер и решений, уже предусмотренных технологией (обучение, медицинский осмотр, радиационный контроль, разработка инструкций и приказов и т. д.), носит больше организационно-процедурный характер и влияет на уровень облучения не более чем на 10%. При этом наибольшее значение имеет реальное обучение профессиональным навыкам в сочетании со знаниями в области радиационной безопасности. Обращает на себя внимание существенный разброс мощностей доз в период выполнения персоналом своих операций от незначительных до очень высоких, а в непосредственной близости от источника значения переходят от уровня «мкЗв» к «мЗв» в час, но с учётом времени контакта не представляют опасности и не должны рассматриваться как нарушение. Однако существующие нормативные документы не учитывают данного обстоятельства. Так, в нормативных документах по деятельности изотопных диагностических и терапевтических отделений мощность дозы внешнего гамма-излучения не должна превышать 12 мкЗв/ч на рабочих местах персонала группы «А». Данное положение опирается на требование «Основных санитарных правил обеспечения радиационной безопасности» СП 2.6.1.2612-10 ОСПОРБ-99/2010, которые определяют уровни мощностей доз как при проектировании, так и для этапа эксплуатации (табл. 6).

На первый взгляд, всё логично, и мы видим прямую зависимость между временем облучения и показателем мощности дозы. Но нужно обратить внимание, что ни в ОСПОРБ, ни тем более в частных нормативных документах каких-либо комментариев, уточнений и разъяснений

по этому поводу нет. И это уже давно привело к разрыву практики радиационного контроля и проектирования с дозовой концепцией норм [26]. Экспертные и лицензированные проектные организации исходят исключительно из показателя мощности дозы. Если некая величина уже содержится в проектной документации, то и органы надзора предъявляют соответствующие требования, зачастую не принимая во внимание сопутствующие обстоятельства, указанные выше, или, например, автоматизацию процессов [34]. Мы видим, что заложенные в нормативных документах стандартизированные критерии не увязывают в должной степени показатель мощности дозы с дозой и не предусматривают использование фактической рабочей нагрузки (времени облучения) при проектировании и оценке результатов радиационного контроля. Практика изобилует такими примерами как в области радионуклидной диагностики и терапии, так и в области рентгенодиагностики.

Известен случай, когда в действующем учреждении проектировщики предложили ставни на окна активных палат в отделении йодной терапии, выходящие на пустырь, с явно избыточным эквивалентом свинца — 10 мм, а также увеличение толщины существующего перекрытия лаборатории изотопной диагностики (^{99m}Tc) на 170 мм бетона, притом что данный клинический радиологический корпус построен по проекту и функционировал с 1965 г. В области стоматологии нормирование пришло к заключению о необходимости «обеспечения регламентируемой для населения мощности дозы рентгеновского излучения (0,3 мкЗв/ч для населения, двойной радиационный фон) не на внешней, а на внутренней поверхности рентгеновского стоматологического кабинета, притом что его площадь по нормативу — 6 м², а специализированные рентгеновские стоматологические аппараты относятся к категории наименее потенциально опасных источников. Противоречия между развивающимися медицинскими технологиями и регулированием налицо и требуют внесения конкретных изменений и уточнений в действующие нормативные документы.

Заключение

1. Рассматриваемая медицинская технология не относится к «высокодозной» по отношению к персоналу и не несёт в себе ядерной опасности по аналогии с техногенными ядерными объектами, в связи с чем необходимо существенно пересмотреть объём мероприятий при подготовке к этапу лицензирования деятельности с источниками ионизирующего излучения для указанной категории радиационных объектов.

2. Дозы персонала в 2–10 раз ниже регламентированных пределов доз, существенно определяются уровнем используемых технологий и прямо зависят от используемой годовой активности. Необходимо разработка методики оценки прогнозируемого облучения по принципу «доз на единицу активности» (Зв/А), что позволит проводить обоснованный расчёт численности персонала.

3. Важным фактором обеспечения радиационной безопасности является выявление наиболее облучаемых групп персонала, наиболее облучаемых органов и тканей, к которым в данном случае необходимо отнести кожу рук и хрусталик глаза. Учитывая новые обстоятельства в вопросе облучения хрусталика глаза, необходимо рекомендовать его защиту для всего персонала, работающего в условиях радиационного облучения (защитные очки).

4. Обучение персонала вопросам радиационной безопасности должно быть тесно увязано с выполнением конкретных рабочих технологий/операций, что должно позволить ему вырабатывать соответствующие неформальные навыки эффективной защиты.

5. Заложенные в нормативных документах стандартизированные критерии не увязывают в должной степени показатель мощности дозы с дозой и не предусматривают использование фактической рабочей нагрузки (времени облучения) при проектировании и оценке результатов радиационного контроля. Необходимы разработка и внесение соответствующих изменений и дополнений в регулирующие документы.

Литература

(п.п. 10, 11, 14, 15, 19, 21, 23–26, 32, 34 см. References)

- Ильин Л.А., Коренков И.П., Наркевич Б.Я. *Радиационная гигиена*. М.: ГЭОТАР-Медиа; 2019.
- Ильин Л.А., ред. *Радиационная медицина. Руководство для врачей-исследователей, организаторов здравоохранения и специалистов по радиационной гигиене. Том I. Теоретические основы радиационной медицины*. М.: ИздАТ; 2004.
- Ярмоненко С.П., Вайнсон А.А. *Радиобиология человека и животных*. М.: Высшая школа; 2004.
- Ильин Л.А., ред. *Глобальные и аварийные выпадения ^{137}Cs ^{90}Sr* . М.: Медицина; 2008.
- Коренков И.П., Лашенова Т.Н., Шандала Н.К., Соболев А.И. *Защита окружающей среды при эксплуатации и выводе из эксплуатации радиационно опасных объектов*. М.: Бинном; 2014.
- Шандала Н.К., Исаев Д.В., Титов А.В., Шалыгин В.В., Бельских Ю.С., Старинский В.Г. и соавт. Оценка радиационной обстановки в районе расположения судоремонтных предприятий, осуществляющих утилизацию судов с ядерной энергетической установкой. *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2019; (5): 9–14. <https://doi.org/10.12737/1024-2019-64-5-9-14>
- Ильин Л.А., Губанов В.А., ред. *Радиационные аварии*. М.; 2001.
- Чипига Л.А. *Оптимизация радиационной защиты пациентов при проведении диагностических исследований методом позитронной эмиссионной томографии*: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. СПб.; 2018.
- Балонов М.И., ред. *Научные основы радиационной защиты в современной медицине*. СПб.; 2019.
- Балонов М.И., Голиков В.Ю., Звонова И.А., Кальницкий С.А., Репин В.С., Сарычева С.С. и соавт. Современные уровни медицинского облучения в России. *Радиационная гигиена*. 2015; 8(3): 67–79.
- 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; 8(4): 32–41.
- Чипига Л.А., Голиков В.Ю., Шлеенкова Е.Н., Поздняков А.В. Оценка коэффициентов перехода от произведения дозы на длину сканирования к эффективной дозе для КТ всего тела путём фантомных экспериментов. *Медицинская физика*. 2016; 72(3): 55–62.
- Водоватов А.В., Голиков В.Ю., Кальницкий С.А., Шацкий И.Г., Чипига Л.А. Анализ уровней облучения взрослых пациентов при проведении наиболее распространённых рентгенографических исследований в Российской Федерации в 2009–2014 гг. *Радиационная гигиена*. 2017; 10(3): 66–75. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-3-66-75>
- Чипига Л.А. Сравнение расчётных методов определения эффективной и органических доз у пациентов при компьютерно-томографических исследованиях. *Радиационная гигиена*. 2017; 10(1): 56–64. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-1-56-64>
- Чипига Л.А., Звонова И.А., Рыжкова Д.В., Меньков М.А., Долгушин М.Б. Уровни облучения пациентов и возможные пути оптимизации ПЭТ-диагностики в России. *Радиационная гигиена*. 2017; 10(4): 31–43. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-4-31-43>
- Костылев В.А., Наркевич Б.Я. *Медицинская физика*. М.: Медицина; 2008.
- Коренков И.П., Охрименко С.Е., Самойлов А.С., Шестопалов Н.В., Прохоров Н.И. Дифференцированный подход к гигиеническим показателям при оценке деятельности радиационных объектов. *Гигиена и санитария*. 2019; 98(3): 256–60. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-3-256-260>
- Охрименко С.Е., Рыжкин С.А., Алехнович А.В., Ермолина Е.П., Перцов В.А. Оценка актуальности контроля эквивалентных доз хрусталика глаза и кожи у медицинского персонала, работающего в поле рентгеновского излучения. В кн.: *Материалы XIII Всероссийского конгресса лучевых диагностов и терапевтов «Радиология-2019»*. М.: МЕДИ Экспо; 2019.
- Охрименко С.Е., Ильин Л.А., Коренков И.П., Морозов С.П., Бирюков А.П., Гомболевский В.А. и соавт. Оптимизация доз облучения пациентов в лучевой диагностике. *Гигиена и санитария*. 2019; 98(12): 1331–7. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-12-1331-1337>
- Кайдановский Г.Н., Шлеенкова Е.Н. О проблемах контроля доз облучения хрусталика глаза. *Радиационная гигиена*. 2016; 9(3): 75–80.
- Международное агентство по атомной энергии, Радиационная защита и безопасность источников излучения. Международные основные нормы безопасности. Вена; 2015.
- СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99/2010. М.; 2010.

References

1. Il'in L.A., Korenkov I.P., Narkevich B.Ya. *Radiation Hygiene [Radiatsionnaya gigiena]*. Moscow: GEOTAR-Media; 2019. (in Russian)
2. Il'in L.A., ed. *Radiation Medicine. A Guide for Physicians, Researchers and Healthcare Professionals and Specialists in Radiation Hygiene. Volume I. Theoretical Foundations of Radiation Medicine [Radiatsionnaya meditsina. Rukovodstvo dlya vrachey-issledovateley organizatorov zdravookhraneniya i spetsialistov po radiatsionnoy gigiene. Tom I. Teoreticheskie osnovy radiatsionnoy meditsiny]*. Moscow: IZdaT; 2004. (in Russian)
3. Yarmonenko S.P., Vaynsan A.A. *Radiobiology of Man and Animals [Radiobiologiya cheloveka i zhivotnykh]*. Moscow: Vysshaya shkola; 2004. (in Russian)
4. Il'in L.A., ed. *Global and Emergency Fallout 137Cs 90Sr [Global'nye i avariynye vypadeniya ¹³⁷Cs ⁹⁰Sr]*. Moscow: Meditsina; 2008. (in Russian)
5. Korenkov I.P., Lashchenova T.N., Shandala N.K., Sobolev A.I. *Environmental Protection During Operation and Decommissioning of Radiation Hazardous Facilities [Zashchita okruzhayushchey sredy pri ekspluatatsii i vyvode iz ekspluatatsii radiatsionno opasnykh ob'ektov]*. Moscow: Binom; 2014. (in Russian)
6. Shandala N.K., Isaev D.V., Titov A.V., Shalygin V.V., Bel'skikh Yu.S., Starinskiy V.G. Radiatib Survey of the Shipyards Involved in Decommissioning and Dismantlement of Nuclear Ships. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost'*. 2019; (5): 9–14. <https://doi.org/10.12737/1024-2019-64-5-9-14> (in Russian)
7. Il'in L.A., Gubanov V.A., eds. *Radiation Accidents [Radiatsionnye avarii]*. Moscow: 2001. (in Russian)
8. Chipiga L.A. *Optimization of radiation protection of patients during diagnostic studies using positron emission tomography*: Diss. St. Petersburg; 2018. (in Russian)
9. Balonov M.I., ed. *Scientific bases of radiation protection in modern medicine*. St. Petersburg; 2019. (in Russian)
10. Balonov M.I., Golikov V.Yu., Kalnitsky S.A., Chipiga L.A., Sarycheva S.S., Shatskiy I.G., et al. Russian practical guidance on radiological support for justification of X-ray and nuclear medicine examinations. *Rad. Prot. Dosim.* 2015; 165(1–4): 39–42. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncv127>
11. Zvonova I., Chipiga L., Balonov M., Ermolina E. Nuclear Medicine Examinations of Children in Russia. *Rad. Prot. Dosim.* 2015; 165(1–4): 216–9. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncv101>
12. Balonov M.I., Golikov V.Yu., Zvonova I.A., Kal'nitskiy S.A., Repin V.S., Sarycheva S.S., et al. Modern levels of medical radiation exposure in Russia. *Radiatsionnaya gigiena.* 2015; 8(3): 67–79. (in Russian)
13. Zvonova I.A., Chipiga L.A., Balonov M.I., Sukhov V.Yu. Radionuclide diagnostics in Saint Petersburg: current state and development problems. *Radiatsionnaya gigiena.* 2015; 8(4): 32–41. (in Russian)
14. Chipiga L., Bernhardsson C. Patient doses in computed tomography examinations in two regions of the Russian Federation. *Rad. Prot. Dosim.* 2016; 169(1–4): 240–4.
15. Chipiga L., Sydoff M., Zvonova I., Bernhardsson C. Investigation of partial volume effect in different PET/CT systems: a comparison of results using the MADEIRA phantom and the NEMA NU-2 2001 phantom. *Rad. Prot. Dosim.* 2016; 169(1–4): 365–70.
16. Chipiga L.A., Golikov V.Yu., Shleenkova E.N., Pozdnyakov A.V. Estimation of transition coefficients from the product of the dose per scan length to the effective dose for whole-body CT by phantom experiments. *Meditsinskaya fizika.* 2016; 72(3): 55–62. (in Russian)
17. Vodovatov A.V., Golikov V.Yu., Kal'nitskiy S.A., Shatskiy I.G., Chipiga L.A. Analysis of radiation levels of adult patients during the most common radiographic studies in the Russian Federation in 2009–2014. *Radiatsionnaya gigiena.* 2017; 10(3): 66–75. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-3-66-75> (in Russian)
18. Chipiga L.A. Comparison of computational methods for determining effective and organ doses in patients with computed tomography studies. *Radiatsionnaya gigiena.* 2017; 10(1): 56–64. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-1-56-64>
19. Vodovatov A.V., Balonov M.I., Golikov V.Yu., Shatskiy I.G., Chipiga L.A., Bernhardsson C. Proposals for the establishment of national diagnostic reference levels for radiography for adult patients based on regional dose surveys in Russian Federation. *Rad. Prot. Dosim.* 2017; 173(1–3): 223–32.
20. Chipiga L.A., Zvonova I.A., Ryzhkova D.V., Men'kov M.A., Dolgushin M.B. Patient radiation levels and possible ways to optimize PET diagnostics in Russia. *Radiatsionnaya gigiena.* 2017; 10(4): 31–43. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-4-31-43> (in Russian)
21. Balonov M., Golikov V., Zvonova I., Chipiga L., Kalnitsky S., Sarycheva S., et al. Patient doses from medical examinations in Russia: 2009–2015. *J. Radiol. Prot.* 2018; 38(1): 121–39.
22. Kostylev V.A., Narkevich B.Ya. *Medical Physics [Meditsinskaya fizika]*. M.: Meditsina; 2008. (in Russian)
23. Wrzesień M. The effect of work system on the hand exposure of workers in ¹⁸F-FDG production centres. *Australas. Phys. Eng. Sci. Med.* 2018; 41(2): 541–8. <https://doi.org/10.1007/s13246-018-0644-9>
24. Wrzesień M. Thyroid exposure during ¹⁸F-FDG production procedures. *Radiat. Prot. Dosimetry.* 2018; 182(4): 464–71. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncy103>
25. Wrzesień M., Napolska K. Investigation of radiation protection of medical staff performing medical diagnostic examinations by using PET/CT technique. *J. Radiol. Prot.* 2015; 35(1): 197–207. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/35/1/197>
26. Wrzesień M. ¹⁸F-FDG production procedures as a source of eye lens exposure to radiation. *J. Radiol. Prot.* 2018; 38(1): 382–93. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/aaa287>
27. Korenkov I.P., Okhrimenko S.E., Samoylov A.S., Shestopalov N.V., Prokhorov N.I. Differentiated approach to hygienic indicators when evaluating the activity of radiation facilities. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-3-256-260> (in Russian)
28. Okhrimenko S.E., Ryzhkin S.A., Alekhovich A.V., Ermolina E.P., Pertsov V.A. Assessment of the relevance of monitoring equivalent doses of the eye lens and skin in medical personnel working in the field of x-ray radiation. In: *Materials of the XIII All-Russian Congress of Radiation. Diagnosticians and Therapists «Radiology-2019» [Materialy XIII Vserossiyskoy kongressa luchevykh diagnostov i terapevtov «Radiologiya-2019»]*. Moscow: MEDI Expo; 2019. (in Russian)
29. Okhrimenko S.E., Il'in L.A., Korenkov I.P., Morozov S.P., Biryukov A.P., Gombolevskiy V.A., et al. Optimization of patient radiation doses in radiation diagnostics. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2019; 98(12): 1331–7. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-12-1331-1337> (in Russian)
30. Kaydanovskiy G.N., Shleenkova E.N. The problems of monitoring radiation exposure of the lens of the eye. *Radiatsionnaya gigiena.* 2016; 9(3): 75–80. (in Russian)
31. IAEA Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards. Vienna; 2015.
32. International Commission on Radiological Protection. *Implications for Occupational Radiation Protection of the New Dose Limit for the Lens of the Eye*. Vienna; 2013.
33. SP 2.6.1.2612-10. Basic sanitary rules for radiation safety OSPORB-99/2010. Federal service of Rospotrebnadzor. Moscow; 2010.
34. Wrzesień M. Simplicity or complexity of the radiopharmaceutical production process in the light of optimization of radiation protection of staff – ^{99m}Tc vs. ¹⁸F. *Med. Pr.* 2018; 69(3): 317–27. <https://doi.org/10.13075/mp.5893.00687>