



Дружинина Ю.В.^{1,2}, Водоватов А.В.^{3,4}, Охрименко С.Е.^{1,2,5}

Сравнительный анализ эффективных доз, рассчитанных по разным методикам, для пациентов при проведении исследований на рентгенодиагностических аппаратах общего назначения

¹ГБУЗ г. Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы», 127051, Москва, Россия;

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

³ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева» Роспотребнадзора, 197101, Санкт-Петербург, Россия;

⁴ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, 194100, Санкт-Петербург, Россия;

⁵ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна» Федерального медико-биологического агентства, 123098, Москва, Россия

Введение. Цель работы – сравнительная оценка эффективных доз, рассчитанных при помощи различных методик, для пациентов при выполнении наиболее распространённых рентгенографических исследований на цифровых рентгеновских аппаратах общего назначения.

Материалы и методы. Сбор данных по параметрам проведения исследований выполнен для семи цифровых рентгеновских аппаратов, расположенных в нескольких медицинских организациях Москвы. Были проанализированы параметры проведения наиболее распространённых рентгенографических исследований у 120 стандартных пациентов за период с октября по декабрь 2019 г.

Результаты. Для всех рентгеновских аппаратов выявлены существенные достоверные различия между эффективными дозами из протоколов аккредитованных лабораторий, рассчитанными на основании радиационного выхода, и эффективными дозами, определёнными авторами на основании собранных значений произведения дозы на площадь. Различия в среднем не превышали $\pm 100\%$, однако для отдельных аппаратов для исследований грудного отдела позвоночника и органов грудной клетки они составляли до порядка величины.

Ограничения исследования. Отсутствие единой стандартизированной методики сбора параметров проведения рентгенографических исследований.

Заключение. Параметры проведения типовых рентгенографических исследований, которые учитываются аккредитованными лабораториями и представлены в действующих методических указаниях по контролю эффективных доз пациентов, достоверно отличаются от параметров исследований, полученных по результатам собственного сбора данных. Существующие методики расчёта эффективных доз требуют актуализации и доработки. Целесообразно отказаться от применения коэффициентов перехода и использовать специализированное программное обеспечение, позволяющее выполнить расчёт эффективной дозы, учитывая геометрию облучения пациентов и физико-технические параметры проведения исследования.

Ключевые слова: медицинское облучение; пациенты; эффективная доза; рентгеновский аппарат общего назначения; произведение дозы на площадь; радиационный выход

Соблюдение этических стандартов. Данные, которые анализировались в данном исследовании, – ретроспективные и не содержат персонализированных данных пациентов. Собирались исключительно геометрические и технические характеристики рентгеновских аппаратов общего назначения, при которых проводились рентгенологические процедуры без учёта персональных данных пациентов. Исследование не требует представления заключения комитета по биомедицинской этике или иных документов.

Для цитирования: Дружинина Ю.В., Водоватов А.В., Охрименко С.Е. Сравнительный анализ эффективных доз, рассчитанных по разным методикам, для пациентов при проведении исследований на рентгенодиагностических аппаратах общего назначения. *Гигиена и санитария*. 2022; 101(2): 124-131. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-2-124-131>

Для корреспонденции: Дружинина Юлия Владимировна, эксперт-физик ГБУЗ «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения г. Москвы», 127051, Москва, Россия. E-mail: yu.druzhinina@nrcpmg.ru

Участие авторов: Дружинина Ю.В. – концепция и дизайн исследования, сбор и обработка материала и данных литературы, статистический анализ, написание текста; Водоватов А.В. – сбор и обработка материала, статистический анализ, редактирование; Охрименко С.Е. – сбор данных литературы, редактирование. Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Поступила: 07.04.2021 / Принята к печати: 25.11.2021 / Опубликовано: 10.03.2022

Yuliya V. Druzhinina^{1,2}, Aleksandr V. Vodovатов^{3,4}, Sergei E. Okhrimenko^{1,2,5}

Comparative analysis of effective doses to patients undergoing examination on general-purpose X-ray machines, calculated by various methods

¹Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, Moscow, 127051, Russian Federation;

²Russian Medical Academy of Continuous Professional Education of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow, 125993, Russian Federation;

³Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene named after Professor P.V. Ramzaev, Saint-Petersburg, 197101, Russian Federation;

⁴St-Peterburg State Pediatric Medical University Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Saint-Petersburg, 194100, Russian Federation;

⁵A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Centre, Moscow, 123182, Russian Federation

Purpose. Comparative evaluation of effective doses to patients calculated using various methods for the most common X-ray examinations performed on general-purpose digital X-ray machines.

Materials and methods. Data collection on parameters of examinations was performed for seven digital X-ray machines located in several Moscow medical facilities. Parameters for the most common X-ray examinations were collected for 120 standard patients from October to December 2019.

Results. For all X-ray machines, significant reliable discrepancies were revealed between effective doses from the protocols of accredited laboratories (calculated based on radiation output) and effective doses determined by the authors based on the collected values of the dose-area product. The differences, on average, did not exceed $\pm 100\%$. However, the discrepancies for the thoracic spine and chest X-ray on some devices were even more significant.

Limitations. Lack of a unified, standardised methodology for collecting parameters of radiological studies.

Conclusion. The parameters of standard X-ray studies, collected by accredited laboratories and presented in the current methodological guidelines for monitoring patients' effective doses, significantly differ from the studies' parameters obtained from our data collection results. The existing methods for calculating effective doses require to be updated and revised. It makes sense to give up using transition coefficients and specialised software that calculates the effective dose, taking into account the geometry of patients' exposure and physical and technical parameters of the study.

Keywords: medical radiation; patients; effective dose; X-ray machines; the values of the dose area product; radiation output

Compliance with ethical standards. The data analysed in this study are retrospective and do not contain personalised patient information. Only geometric and technical characteristics of general-purpose X-ray machines in which X-ray procedures were collected were performed without considering personal patient data. The study does not require a conclusion of the Biomedical Ethics Committee or other documentation.

For citation: Druzhinina Yu.V., Vodovатов A.V., Okhrimenko S.E. Comparative analysis of effective doses to patients undergoing examination on general-purpose X-ray machines, calculated by various methods. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2022; 101(2): 124–131. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-2-124-131> (in Russian)

For correspondence: Yuliya V. Druzhinina, expert Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, Moscow, 127051, Russian Federation. E-mail: yu.druzhinina@npcmr.ru

Information about the authors:

Druzhinina Yu.V., <https://orcid.org/0000-0002-3230-3722> Vodovатов A.V., <https://orcid.org/0000-0002-5191-7535>
Okhrimenko S.E., <https://orcid.org/0000-0002-8282-1798>

Contribution: Druzhinina U.V. – the concept and design of the study, collection and processing of material and literature data, statistical analysis, writing a text; Vodovатов A.V. – the collection and processing of the material, statistical analysis, editing; Okhrimenko S.E. – collection of literature data, editing. All co-authors – approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article.

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

Acknowledgement. The study had no sponsorship.

Received: April 7, 2021 / Accepted: November 25, 2021 / Published: March 10, 2022

Введение

Радиационная защита пациентов при медицинском облучении обеспечивается путём обоснования назначений рентгенорадиологических исследований и их оптимизации – поддержания доз облучения пациентов на таких низких уровнях, при которых может быть получено качественное диагностическое изображение. Принцип оптимизации широко применяется в зарубежной практике [1–3]. Отдельным европейским странам (например, Великобритании) систематическое применение принципа оптимизации позволило снизить за последние 10 лет уровни облучения пациентов при наиболее распространённых рентгенорадиологических исследованиях в 1,5–2 раза, что ещё раз подчёркивает его эффективность [4, 5].

Актуальность внедрения в практику отечественного здравоохранения принципа оптимизации радиационной

защиты и лучевой диагностики обусловлена систематическим ростом числа рентгенорадиологических исследований и соответствующим ростом коллективной дозы населения Российской Федерации от медицинского облучения за последние годы. Большое значение, с точки зрения радиационной защиты, принадлежит рентгенографическим и рентгеноскопическим исследованиям в связи с их широким распространением и вторым по величине после компьютерной томографии вкладом в коллективную дозу (25% в 2019 г.). За период 2014–2019 гг. число рентгенографических исследований выросло на 10% (с 174 до 192 млн) при практически неизменном числе рентгеновских аппаратов [6, 7]. Это свидетельствует о росте пропускной способности рентгеновских кабинетов и, как следствие, о сокращении времени, отводимого на обследование одного пациента, что способно негативно сказаться на состоянии радиационной защиты пациентов.

Совершенствование технологий (переход на цифровые рентгеновские аппараты) не приводит к предполагаемому снижению индивидуальных доз пациентов. В отечественной литературе уже освещался вопрос о необходимости эффективного контроля доз облучения пациентов и режимов эксплуатации аппаратов, обслуживаемых персоналом, с применением проходных ионизационных камер [8, 9]. Способность цифровых приёмников изображения получать качественные снимки в широком динамическом диапазоне и недостаточный уровень подготовки врачей-рентгенологов и рентгенлаборантов в области радиационной безопасности приводит к систематическому росту индивидуальных доз пациентов за счёт использования высокодозовых параметров проведения рентгенографии, связанного с желанием получить высококачественное («идеальное») изображение. Данная тенденция в зарубежных источниках описывается термином «dose creep» [10]. После замены аналогового рентгеновского аппарата на цифровой персонал зачастую продолжает работать на привычных режимах, характерных для аналоговой аппаратуры. Как следствие индивидуальные (и средние) дозы облучения пациентов на цифровых аппаратах в Российской Федерации сопоставимы [11] и даже могут превышать [12] дозы облучения на аналоговых аппаратах.

Объективный учёт и анализ дозовых нагрузок являются обязательными условиями выработки тактики и стратегии оптимизации дозовых нагрузок при медицинском облучении [13, 14], для чего за рубежом в большинстве рентгенодиагностических технологий успешно применяются клинические дозиметры на основе бестеневых проходных ионизационных камер, фиксирующих дозиметрический показатель «произведение дозы на площадь» (DAP-metr) [15–19]. Это позволяет решать широкий круг вопросов оценки и регулирования дозовых нагрузок на пациентов, оценки эффективных доз и радиогенных рисков.

Первым этапом оптимизации радиационной защиты пациентов является достоверная оценка индивидуальных доз облучения, которая в Российской Федерации производится преимущественно по величине эффективной дозы, рассчитываемой согласно методическим указаниям МУ 2.6.1.2944-11¹. В рентгенографии расчёт эффективной дозы основывается на использовании коэффициентов перехода от произведения дозы на площадь или радиационного выхода рентгеновского аппарата к эффективной дозе. Применение специализированного программного обеспечения (ПО) для расчёта эффективной дозы в отечественной практике не распространено.

У метода расчёта эффективных доз по МУ 2.6.1.2944-11 существует ряд недостатков. Для каждой возрастной категории (дети, взрослые) представлен ограниченный набор коэффициентов перехода для небольшого (1–2) числа режимов проведения рентгенографических исследований. Фокусные расстояния, размеры полей, энергетические характеристики пучка рентгеновского излучения (анодное напряжение, толщина полной фильтрации) существенно отличаются от используемых на практике, что может приводить к недооценке или переоценке эффективной дозы и существенно затруднять оценку доз облучения пациентов в рамках оптимизационного процесса.

Материалы и методы

В ходе работы были собраны данные о параметрах проведения наиболее распространённых рентгенографических исследований пациентов в нескольких медицинских организациях Москвы. В качестве наиболее распространённых были выбраны рентгенографические исследования лёгких, шейного, грудного и поясничного отделов позвоночника в прямой и боковой проекциях. Сбор данных по параметрам

проведения исследований был выполнен для семи цифровых рентгеновских аппаратов: четыре DR-F (GE, США), два Raffine (Toshiba, Япония), один FDR AcSelerate DR-XD-200 (Fujifilm, США). Все рентгеновские аппараты были оснащены однотипными приёмниками изображения – плоскопанельными детекторами непрямого преобразования (аморфный Si + скинциллятор CsI). Все аппараты находились в эксплуатации менее 10 лет. Аппараты одной марки были установлены в медицинских организациях одновременно, в рамках модернизации аппаратного парка. Рентгенографические исследования на всех аппаратах проводились с использованием систем автоматического контроля экспозиции (АКЭ), калибровка которых была выполнена представителями компании-производителя. Выбранные аппараты по своим характеристикам и режимам эксплуатации являются типовыми и соответствуют большей части парка рентгеновских аппаратов, эксплуатируемых в Департаменте здравоохранения г. Москвы.

Произведение дозы на площадь ($\text{мкГр} \cdot \text{м}^2$) измеряли с использованием проходных ионизационных камер (ПИК) двух моделей – VacuDar (GE) и Kerma (Iba). Используемые средства измерений имели действующие свидетельства о поверке и прошли предварительную калибровку и сличение показателей с эталонным (поверочным) прибором ДРК-1П.

В общей сложности были собраны данные по 120 стандартным пациентам, полученные за период с октября по декабрь 2019 г. Для каждого пациента при каждом рентгенографическом исследовании фиксировались следующие параметры: рост (см), возраст (лет), масса тела (кг), анодное напряжение (кВ), расстояние источник – приёмник (см), размер поля облучения (см × см), экспозиция после срабатывания АКЭ (мАс), произведение дозы на площадь ($\text{мкГр} \cdot \text{м}^2$). Параметры фиксировались непосредственно при проведении исследования в специально разработанной анкете, и в дальнейшем была проведена верификация данных путём анализа цифровых метафайлов изображений в формате DICOM.

При сравнительном анализе эффективных доз для каждого аппарата был использован соответствующий актуальный протокол расчёта эффективных доз для пациентов, основанный на измерениях радиационного выхода, проведённых аккредитованной испытательной лабораторией.

В ходе работы был проведён расчёт эффективных доз с использованием ПО РСХМС 2.0 по радиационному выходу рентгеновского аппарата и произведению дозы на площадь при учёте реальных значений технических и геометрических параметров проведения исследований и выполнена сравнительная оценка полученных результатов с данными протоколов расчёта эффективных доз, рассчитанных специалистами аккредитованных лабораторий радиационного контроля для медицинских организаций, в которых проводился сбор данных.

Расчёт эффективной дозы пациентов был выполнен несколькими способами.

Способ 1. В соответствии с МУ 2.6.1.2944-11 с использованием формул (1) и (2):

$$E = \Phi \cdot K_d, \text{ мкЗв}, \quad (1)$$

где Φ – измеренная величина произведения дозы на площадь, $\text{сГр} \cdot \text{см}^2$; K_d – коэффициент перехода от значения ПДП к эффективной дозе облучения у пациента данного возраста с учётом вида проведённого рентгенологического исследования, проекции, размеров поля, фокусного расстояния и анодного напряжения на рентгеновской трубке, $\text{мкЗв}/(\text{сГр} \cdot \text{см}^2)$;

$$E = R \cdot i \cdot t \cdot K_e, \text{ мкЗв}, \quad (2)$$

где R – радиационный выход рентгеновского излучателя при заданном значении анодного напряжения, $(\text{мГр} \cdot \text{м})/(\text{мА} \cdot \text{с})$; i – ток рентгеновской трубки, мА; t – время экспозиции, с; K_e – коэффициент перехода от значения радиационного

¹ МУ 2.6.1.2944-11 «Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении рентгенологических исследований». Методические указания. М.: Роспотребнадзор, 2011. 100 с.

Таблица 1 / Table 1

Варианты технических и геометрических характеристик проведения исследования

Options for technical and geometric characteristics of the study

Область исследования Area of the study	Проекция Projection	Кол-во процедур Number of procedures	Размер поля, см Field size, cm			Фокусное расстояние, см Focal distance, cm		Напряжение, кВ Voltage, kV		Экспозиция, мАс Exposure, mAs	
			п p	д / d		п p	д d	п p	д d	п p	д d
				min	max						
Лёгкие (г) Lungs (g)	ЗП (РА)	38	30 × 40	22 × 37	40 × 40	100. 150	150. 180	100	70. 120. 125	6	0.8–181
	Б (L)	15	30 × 40	25 × 37	40 × 40	150	150. 180	110	70. 75. 80. 120. 130	8	2.7–326
Шейный отдел позвоночника (г) Cervical spine (g)	ЗП (РА)	11	18 × 24	11 × 21	21 × 39	80	100. 150	75	60. 70. 75	6	5.1–30
	Б (L)	10	18 × 24	17 × 21	21 × 39	80	100. 150	75	60. 70	6	6.4–32.6
Грудной отдел позвоночника (г) Thoracic spine (g)	ПЗ (АР)	16	24 × 30	31 × 18	40 × 40	100	100	75	70.77	10	1–200
	Б (L)	16	24 × 30	30 × 40	40 × 40	100	100	80	70	25	7–381
Поясничный отдел позвоночника (г) Lumbar spine (g)	ПЗ (АР)	13	24 × 30	16 × 38	30 × 40	100	100	80	60. 70. 80	30	44–123
	Б (L)	11	24 × 30	16 × 38	30 × 40	100	100	90	85. 87. 90	40	40–92
Таз, крестец Pelvis, sacrum	ПЗ (АР)	12	40 × 30	40 × 40	40 × 40	100	150	80	77. 83	20	5.6–230
	Б (L)	7	30 × 24	40 × 40	40 × 40	100	150	85	77. 83	40	4.3–40

Примечание. п – данные протоколов; д – результаты сбора данных. Здесь и в табл. 2: ЗП – задне-передняя; Б – боковая; ПЗ – передне-задняя.

Note. p – protocol data; d – data collection results. Here and in Table 2: PA – posteroanterior; L – lateral; AP – anteroposterior.

выхода рентгеновского излучателя к эффективной дозе облучения пациента данного возраста с учётом вида проведённого рентгенологического исследования, проекции, размеров поля, фокусного расстояния и анодного напряжения на рентгеновской трубке, мкЗв/(мГр · м²).

Способ 2. С использованием ПО РСХМС 2.0 на основе измеренного произведения дозы на площадь или по радиационному выходу рентгеновского аппарата. Поскольку РСХМС 2.0 позволяет использовать для оценки эффективной дозы только входную дозу, для каждого исследования был выполнен пересчёт радиационного выхода на входную дозу с использованием формулы 3:

$$ВД = \frac{k \cdot R \cdot Q \cdot 10^4}{60 \cdot (РИП - l)^2}, \text{ мГр}, \quad (3)$$

где k – коэффициент обратного рассеяния, принятый равным 1,4 вне зависимости от спектра рентгеновского излучения в диапазоне напряжений на трубке от 50 до 150 кВ, отн. ед.; R – радиационный выход рентгеновского аппарата, мГр · м² / мА · мин; Q – экспозиция, мАс; $РИП$ – расстояние от фокуса трубки до приёмника рентгеновского изображения, см; l – толщина тела пациента, принимаемая равной 20 см в передне-задней проекции и 40 см в боковой проекции.

Обработка полученных результатов проведена методами статистического анализа².

Результаты

Сравнение диапазонов физических и геометрических параметров проведения выбранных рентгенографических исследований по результатам собственного сбора данных с соответствующими параметрами, закреплёнными в нормативных документах по расчёту эффективных доз^{1,3}, приведено в табл. 1. Специалисты испытательных лабораторий

выполняют измерения радиационного выхода, на основании которого рассчитываются значения эффективных доз пациента, по техническим и геометрическим параметрам, которые предоставляет заказчик для каждой рентгенологической процедуры, проводимой на конкретном рентгеновском аппарате. Анализ протоколов аккредитованных лабораторий для выбранных медицинских организаций показал, что технические и геометрические параметры, при которых измеряли радиационный выход, совпадают с параметрами, приведёнными в МУ 2.6.1.2944-11 и МУ 2.6.1.3584-19, и не совпадают с реальными параметрами, при которых проводились исследования (см. табл. 1).

В табл. 2 приведены результаты сравнительного анализа эффективных доз для каждого рентгеновского аппарата в следующем формате: R – радиационный выход для соответствующего рентгеновского аппарата для каждой рентгенологической процедуры, предоставленный аккредитованной лабораторией радиационного контроля в протоколе контроля эффективных доз; $ВД$ (мГр) – входная доза, определённая авторами с использованием выражения (3) на основе радиационного выхода рентгеновского аппарата; $E_{РМУ}$ (мкЗв) – значения эффективных доз из протокола аккредитованной лаборатории радиационного контроля, рассчитанные для соответствующей рентгенологической процедуры на основании радиационного выхода R согласно МУ 2.6.1.2944-11 и МУ 2.6.1.3584-19; $E_{РПО}$ (мкЗв) – значения эффективных доз, рассчитанные авторами на основании радиационного выхода R согласно МУ 2.6.1.2944-11 и МУ 2.6.1.3584-19; $E_{ПДМУ}$ (мкЗв) – значения эффективных доз, рассчитанные авторами с использованием ПО РСХМС 2.0; $ПДП$ (мГр · см²) – значение произведения дозы на площадь, полученные авторами с установленных на рентгеновских аппаратах проходных ионизационных камер; $E_{ПДПМУ}$ (мкЗв) – значения эффективных доз, рассчитанные авторами для соответствующей рентгенологической процедуры на основании $ПДП$ согласно МУ 2.6.1.2944-11 и МУ 2.6.1.3584-19; $E_{ПДПО}$ (мкЗв) – значения эффективных доз, рассчитанные авторами на основании измеренных значений $ПДП$ с использованием ПО РСХМС 2.0; $\Delta_1, \%$ – относительная погрешность значений $E_{РМУ}$ (мкЗв) по отношению к соответствующим значениям $E_{ПДПМУ}$ (мкЗв); $\Delta_2, \%$ – относительная погрешность значений $E_{РПО}$ (мкЗв) (мкЗв) по отношению к соответствующим значениям $E_{ПДПО}$ (мкЗв).

² ГОСТ Р ИСО 3534-1-2019 Статистические методы. Словарь и условные обозначения. Часть 1. Общие статистические термины и термины, используемые в теории вероятностей.

³ МУ 2.6.1.3584-19 «Изменения в МУ 2.6.1.2944-11. «Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении рентгенологических исследований». Методические указания. М.: Роспотребнадзор, 2019.

Таблица 2 / Table 2

Результаты сравнительного анализа расчётов эффективных доз по результатам измерения произведения дозы на площадь и радиационного выхода для каждого цифрового рентгеновского аппарата общего назначения

Results of comparative analysis of effective dose calculations based on the values of measuring the dose-area product and radiation output for each general-purpose digital X-ray machine

Область исследования Area of the study	Проекция Projection	Значение параметра Parametr value	R , мГр·м ² /мАс mGy·m ² /mAs	E_{RMV} , мкЗв E_{RMU} , μZv	V/I , мГр Input dose (ID), mGy	E_{RPO} , мкЗв E_{RPO} , μZv	ПДП, мГр·см ² Dose area product, mGy·cm ²	E_{DAPMU} , мкЗв E_{DAPMU} , μZv	E_{DAPPO} , мкЗв E_{DAPPO} , μZv	Δ_1 , %	Δ_2 , %
DR-F1											
Шейный отдел позвоночника Cervical spine	ЗП (РА)	max	0.034	7.7	1.21	117.5	43.3	21.7	38.4	182	-67
		min			0.4	27.3	14.1	7.1	28.8	-8	6
	Б (L)	max	0.034	17.3	1.3	68.2	65.6	85.3	31.1	394	-54
		min			0.5	20.3	17.9	23.3	14.3	35	-30
Грудной отдел позвоночника Thoracic spine	ПЗ (АР)	max	0.034	54.2	5.2	738.6	326.1	782.6	612.4	1344	-17
		min			4.6	762.5	187.4	449.8	363.1	730	-52
	Б (L)	max	0.039	92.7	4.5	200.7	231.7	301.2	93.0	225	-54
		min			1.7	73.1	87.4	113.6	243.4	23	233
Поясничный отдел позвоночника Lumbar spine	ПЗ (АР)	max	0.039	210.9	12.7	1232.3	571.0	1427.5	1231.5	577	-0.1
		min			3.1	338.1	130.9	327.3	385.5	55	14
	Б (L)	max	0.051	144.1	9.4	413.1	420.7	420.7	760.4	192	84
		min			0.9	45.2	44.1	44.1	54.5	-69	21
DR-F2											
Шейный отдел позвоночника Cervical spine	ЗП (РА)	max	0.034	7.7	3.6	239.7	113.0	56.5	232.1	634	-3
		min			0.5	30.2	17.6	8.8	33.4	14	11
	Б (L)	—	0.034	17.3	0.7	32.4	31.1	40.43	22.0	134	-32
Грудной отдел позвоночника Thoracic spine	ПЗ (АР)	max	0.034	54.2	10.5	1028.6	572.6	1374.24	1259.1	2436	22
		min			0.1	32.8	7.6	18.24	23.5	-66	-28
	Б (L)	max	0.039	92.7	35.3	965.6	1540.2	2002.26	1395.6	2060	45
		min			0.9	49.4	20.4	26.52	31.0	-71	-37
DR-F3											
Лёгкие Lungs	ЗП (РА)	max	0.105	52.5	0.1	34.6	13.9	27.8	54.6	-47	58
		Min			0.1	16.4	4.3	8.6	16.9	-84	3
	Б (L)	max	0.105	42.0	1.0	120.5	78.8	118.2	148.4	181	23
		min			0.2	23.7	9.6	14.4	18.0	-66	-24
Шейный отдел позвоночника Cervical spine	ЗП (РА)	max	0.39	11.6	0.5	30.6	10.0	5	26.3	-57	-14
	Б (L)	max	0.39	21.6	0.5	18.5	10.4	13.52	15.2	-37	-18
Поясничный отдел позвоночника Lumbar spine	ПЗ (АР)	max	0.045	104.1	5.9	508.9	189.8	474.5	488.4	356	-4
	Б (L)	max	0.58	165.6	24.3	696.6	423.5	423.5	672.8	156	-3
DR-F4											
Шейный отдел позвоночника Cervical spine	ЗП (РА)	max	0.034	7.8	1.1	93.5	40.3	20.15	63.3	158	-32
		min			0.8	71.5	34.0	17	53.5	118	-25
	Б (L)	max	0.034	17.5	1.2	65.6	62.6	81.38	62.5	365	-5
		min			0.5	26.1	20.1	26.13	20.0	49	-23
Грудной отдел позвоночника Thoracic spine	ПЗ (АР)	max	0.034	54.4	9.5	960.4	562.5	1350	1269.3	2382	32
		min			4.4	1086.0	189.9	455.76	536.8	738	-51
	Б (L)	max	0.04	95.0	32.0	1051.0	1502.7	1953.51	1633.3	1956	55
		min			1.7	112.9	92.3	119.99	135.5	26	20

Продолжение таблицы на стр. 129 / Continuation of table on page 129

Продолжение Таблицы 2. Начало на стр. 128 / Continuation of Table 2. Beginning on page 128

Область исследования Area of the study	Проекция Projection	Значение параметра Parameter value	R , мГр·м ² /мАс mGy·m ² /mAs	E_{RMU} , мкЗв E_{RMU} , μZv	$ВД$, мГр Input dose (ID), mGy	E_{RPO} , мкЗв E_{RPO} , μZv	ПДП, мГр·см ² Dose area product, mGy·cm ²	E_{DAPMU} , мкЗв E_{DAPMU} , μZv	E_{DAPPO} , мкЗв E_{DAPPO} , μZv	Δ_1 , %	Δ_2 , %
DR-F4											
Поясничный отдел позвоночника Lumbar spine	ПЗ (AP)	max	0.04	216.0	6.1	594.6	366.6	916.5	859.4	324	44.53414
		min									
	Б (L)	max	0.051	144.8	13.7	617.5	418.5	418.5	665.0	189	8
		min									
Raffine 1											
Лёгкие Lungs	ЗП (РА)	max	0.061	36.3	1.7	350.5	196.7	393.4	554.4	984	58
		min									
	Б (L)	max	0.063	40.3	4.6	238.1	317.9	476.85	394.3	1083	66
		min									
Грудной отдел позвоночника Thoracic spine	ПЗ (AP)	max	0.046	73.2	1.7	347.1	196.3	471.12	553.3	544	59
		min									
	Б (L)	max	0.049	93.6	0.9	48.1	28.6	37.18	35.5	-60	-26
		min									
Таз, крестец Pelvis, sacrum	ПЗ (AP)	max	0.052	377.8	2.1	487.7	242.7	485.4	547.2	29	12
		min									
	Б (L)	max	0.055	199.3	1.1	61.1	72.1	93.73	64.1	-53	5
		min									
Raffine 2											
Лёгкие Lungs	ЗП (РА)	max	0.061	36.3	0.2	44.9	20.9	41.8	74.8	15	67
		min									
Грудной отдел позвоночника Thoracic spine	ПЗ (AP)	max	0.046	73.2	0.7	52.9	36.7	88.08	128.0	20	142
		min									
	Б (L)	max	0.049	93.6	0.7	11.1	21.0	27.3	29.0	-71	161
		min									
Таз, крестец Pelvis, sacrum	ПЗ (AP)	max	0.052	377.8	2.3	621.0	260.9	521.8	452.7	38	-27
		min									
	Б (L)	max	0.055	199.3	0.65	37.3	44.0	57.2	39.1	-71	5
		min									
FDR											
Лёгкие Lungs	ЗП (РА)	max	0.087	34.9	0.1	19.0	8.7	17.4	3.6	-50	-81
		min									
	Б (L)	max	0.103	32.9	0.4	50.0	8.2	19.68	17.2	-40	-65
		min									
Шейный отдел позвоночника Cervical spine	ЗП (РА)	–	0.032	24.0	0.4	21.3	1.4	0.7	4.0	-97	-81
	Б (L)	–	0.032	53.7	0.3	10.8	0.6	0.78	0.9	-99	-92
Грудной отдел позвоночника Thoracic spine	ПЗ (AP)	–	0.041	131.0	0.7	148.5	2.8	6.72	9.6	-95	-93
	Б (L)	–	0.043	101.8	0.9	49.9	3.2	4.16	4.8	-96	-90
Поясничный отдел позвоночника Lumbar spine	ПЗ (AP)	–	0.051	366.2	1.0	250.5	9.7	24.25	0.96	-93	-100
	Б (L)	–	0.051	227.5	6.0	308.5	38.1	38.1	6.02	-83	-98

Note. ID (mGy) is the input dose determined by the authors using expression (3) based on the radiation output of the X-ray machine; E_{RMU} (μZv) – values of effective doses from the protocol of the accredited radiation monitoring laboratory, calculated for the corresponding X-ray procedure based on the radiation output R according to MU 2.6.1.2944-111 and MU 2.6.1.3584-193; E_{RPO} (μZv) – values of effective doses calculated by the authors based on radiation output using PCXMC 2.0 software; Dose area product (mGy·cm²) – the value of the dose-area product obtained by the authors from the through-hole ionisation chambers installed on the X-ray machines; E_{DAPMU} (μZv) – values of effective doses calculated by the authors for the corresponding X-ray procedure based on the RAP according to MU 2.6.1.2944-111 and MU 2.6.1.3584-193; E_{DAPPO} (μZv) – effective dose values calculated by the authors based on the measured MPD values using PCXMC 2.0 software; Δ_1 , % – relative error of E_{RMU} values (μZv) relating to the corresponding values of E_{RPMU} (μZv); Δ_2 , % – relative error of E_{RPO} values (μZv) in relation to the corresponding values of E_{DAPPO} (μZv).

Обсуждение

Как следует из табл. 1, значимые различия присутствуют для размеров полей облучения для всех типов процедур, по которым проводился анализ. Для фокусных расстояний различия присутствуют для исследований лёгких, шейного отдела позвоночника и таза; для анодного напряжения — для исследований лёгких, шейного и поясничного отделов позвоночника. Значения экспозиции, используемые испытательными лабораториями при расчёте эффективных доз, для всех исследований относились к нижней границе диапазона экспозиций, определённых при регистрации параметров проведения исследований для реальных пациентов.

Для всех рентгеновских аппаратов выявлены существенные достоверные различия между эффективными дозами из протоколов аккредитованных лабораторий (рассчитанными на основании радиационного выхода) и эффективными дозами, определёнными авторами на основании собранных значений произведения дозы на площадь. Различия в среднем не превышали $\pm 100\%$, однако для отдельных аппаратов для исследований грудного отдела позвоночника и органов грудной клетки они составляли до порядка величины. Данные различия обуславливаются в первую очередь использованием аккредитованными лабораториями anomalно низких значений экспозиции, а также физико-технических режимов проведения исследований, отличавшихся от используемых на практике. Следует отметить, что для всех рентгеновских аппаратов рентгенлаборанты выполняли коллимацию поля облучения для индивидуальных пациентов, что не нашло своего отражения в протоколах аккредитованных лабораторий.

Достоверные различия были получены также между эффективными дозами, рассчитанными с использованием ПО РСХМС 2.0 по входной дозе и по ПДП. Данные различия, как правило, находились в пределах $\pm 70\%$, для отдельных исследований составляли до 3–5 раз. Это может быть объяснено некорректным определением аккредитованными лабораториями радиационного выхода. Все прочие параметры (геометрия облучения, размеры и локализация полей облучения, анодное напряжение и экспозиция) в моделях исследований ПО РСХМС 2.0 были идентичными. К сожалению, собственные данные по расчёту радиационного выхода для данных аппаратов отсутствуют.

Результаты, представленные в табл. 1 и 2, указывают на необходимость совершенствования методов сбора и оценки данных, используемых для расчёта эффективных доз пациентов при проведении рентгенографических исследований. В первую очередь представленный в МУ 2.6.1.2944-11 перечень коэффициентов перехода нуждается в расширении и актуализации (см. табл. 1) с учётом большего количества режимов рентгенографии. Для решения данной проблемы необходимо стандартизировать методику сбора параметров проведения рентгенографических исследований с внедрением жёстких требований к объёму выборок пациентов, а затем по результатам анализа определять режимы проведения выбранного рентгенографического исследования и рассчитывать среднюю эффективную дозу. Такая стандартная методика была представлена в МР 2.6.1.0066-12⁴, но на сегодняшний день она не нашла практического применения. Только после внедрения в практику единой методики сбора исходных данных можно надеяться на повышение достоверности расчёта эффективных доз.

Также целесообразно проводить расчёт эффективных доз на основе измеренного ПДП. Результаты, полученные в Санкт-Петербургском научно-исследовательском институте радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева [20–23], указывают на достоверные раз-

личия в результатах измерения радиационного выхода в рамках собственного сбора данных в медицинских организациях и результатов, представленных в актуальных протоколах контроля эксплуатационных параметров. Данные различия объясняются процедурными ошибками при определении радиационного выхода. При работе на цифровых рентгеновских аппаратах индивидуальные значения ПДП для отдельных пациентов фиксируются в цифровых архивах рентгеновских изображений и могут быть легко верифицированы при необходимости проверки результатов расчёта эффективных доз.

Заключение

Представленные данные анализа результатов расчёта эффективных доз, полученных на основе измеренных значений радиационного выхода и произведения дозы на площадь разными методами, позволяют сделать следующие выводы:

1. Параметры проведения типовых рентгенографических исследований, которые учитываются аккредитованными лабораториями, представленные в действующих методических указаниях по контролю эффективных доз пациентов, достоверно отличаются от параметров исследований, полученных по результатам собственного сбора данных. Основные различия наблюдались для размеров полей облучения — при исследованиях лёгких, шейного отдела позвоночника и таза; для анодного напряжения — при исследованиях лёгких, шейного и поясничного отделов позвоночника; для экспозиции — при всех исследованиях. Основным фактором, определяющим некорректную оценку эффективных доз, является использование заниженных, вплоть до порядка величины, значений экспозиции. Данные недостатки обуславливают необходимость разработки и внедрения в практику единых требований к сбору исходных данных для оценки эффективных доз или перехода на автоматизированный сбор данных с помощью специализированного программного обеспечения. Наиболее перспективным методом является использование специального программного обеспечения, с помощью которого можно не только собирать массив данных по дозам облучения пациентов, но и при необходимости верифицировать результаты расчёта эффективных доз.

2. Коэффициенты перехода от измеренных дозиметрических величин к рассчитанным значениям эффективных доз, приведённые в МУ 2.6.1.2944-11, нуждаются в актуализации и расширении списка параметров проведения рентгенографических исследований с учётом технических характеристик работы современных рентгеновских аппаратов. Целесообразно отказаться от применения коэффициентов перехода и использовать специальное программное обеспечение для выполнения расчёта эффективной дозы с учётом геометрии облучения пациентов и физико-технических параметров проведения исследования. Однако использование такого программного обеспечения также требует строгого соблюдения методики сбора исходных данных и наличия квалифицированных специалистов, отвечающих за оценку эффективных доз в медицинской организации или в аккредитованной лаборатории радиационного контроля.

3. Для оптимизации рентгенографических исследований предпочтительным является фиксирование в журналах проведения рентгеновского исследования или в радиологических информационных системах измеренных значений ПДП в дополнение к эффективной дозе, что позволит проводить верификацию значений эффективных доз, представленных аккредитованными лабораториями. При этом для повышения точности и качества дозиметрической информации, объективизации контроля проводимых исследований и улучшения условий работы рентгенлаборантов следует отдавать предпочтение автоматизации процесса сбора и учёта дозиметрической информации.

⁴ МР 2.6.1.0066-12 «Применение референтных диагностических уровней для оптимизации радиационной защиты пациента в рентгенологических исследованиях общего назначения». Методические рекомендации. М.: Роспотребнадзор, 2012. 20 с.

Литература

(п.п. 1, 2, 4, 5, 10, 15–20, 22 см. References)

3. Балонов М.И., ред. *Публикация МКРЗ 105. Радиационная защита в медицине*. Пер. с англ. СПб.; 2011.
6. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К., Водоватов А.В., Башкетова Н.С., Историк О.А. 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; 12(1): 6–24. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-1-6-24>
7. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К., Водоватов А.В., Башкетова Н.С., Историк О.А. 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; 12(2): 6–24. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-2-6-24>
8. Охрименко С.Е., Воронин К.В., Иванов С.И., Аكوпова Н.А. Обеспечение радиационной безопасности в рентгенодиагностике с применением новых технологий. *Здравоохранение и медицинская техника*. 2004; 4(8): 36–7.
9. Охрименко С.Е., Воронин К.В., Иванов С.И. Эффективные дозы пациентов, полученные на основе измерений ДРК-1 в ЛПУ г. Москвы. *АНРИ*. 2003; (1): 38–43.
11. Водоватов А.В. Практическая реализация концепции референтных диагностических уровней для оптимизации защиты пациентов при проведении стандартных рентгенографических исследований. *Радиационная гигиена*. 2017; 10(1): 47–55. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-1-47-55>
12. Водоватов А.В., Голиков В.Ю., Кальницкий С.А., Шацкий И.Г., Чипига Л.А. Анализ уровней облучения взрослых пациентов при проведении наиболее распространенных 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>
13. 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>
14. Охрименко С.Е., Ильин Л.А., Коренков И.П., Морозов С.П., Бирюков А.П., Гомболевский В.А. и др. 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>
21. Голиков В.Ю., Чипига Л.А., Водоватов А.В., Сарычева С.С. Дополнения и изменения в оценке эффективных доз внешнего облучения пациентов при медицинских исследованиях. *Радиационная гигиена*. 2019; 12(3): 120–32.
23. Балонов М.И., Голиков В.Ю., Водоватов А.В., Чипига Л.А., Звонова И.А., Кальницкий С.А. и др. Научные основы радиационной защиты в современной медицине. В кн.: Балонов М.И., ред. *Лучевая диагностика*. СПб.; 2019.

References

1. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation. Specific Safety Guide № SSG-46. Vienna: IAEA; 2018.
2. International Atomic Energy Agency. Dosimetry in Diagnostic Radiology: An International Code of Practice. Technical Reports Series 457. Vienna: IAEA; 2007.
3. ICRP Publication 105. Radiological Protection in Medicine. Elsevier; 2007.
4. Hart D., Wall D.F., Hillier M.C., Shrimpton P.C. *Frequency and Collective Dose for medical and dental X-ray examinations in the UK*. HPA-CRCE-012; 2010.
5. Hart D., Wall D.F., Hillier M.C., Shrimpton P.C. *Doses to Patients from Radiographic and Fluoroscopic X-ray Imaging Procedures in the UK-2010*. Review. HPA-CRCE-034; 2012.
6. Onishchenko G.G., Popova A.Yu., Romanovich I.K., Vodovатов A.V., Bashketova N.S., Istorik O.A., et al. Modern principles of the radiation protection from sources of ionizing radiation in medicine. Part 1: radiation risks and development of the system of radiation protection. *Radiatsionnaya gigiena*. 2019; 12(1): 6–24. (in Russian)
7. Onishchenko G.G., Popova A.Yu., Romanovich I.K., Vodovатов A.V., Bashketova N.S., Istorik O.A., 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 gigiena*. 2019; 12(2): 6–24. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-2-6-24> (in Russian)
8. Okhrimenko S.E., Voronin K.V., Ivanov S.I., Akopova N.A. Ensuring radiation safety in X-ray diagnostics using new technologies. *Zdravookhranenie i meditsinskaya tekhnika*. 2004; 4(8): 36–7. (in Russian)
9. Okhrimenko S.E., Voronin K.V., Ivanov S.I. Effective doses of patients obtained on the basis of measurements of DRC-1 in a medical facility in Moscow. *ANRI*. 2003; (1): 38–9. (in Russian)
10. Erenstein H.G., Browne D., Curtin S., Dwyer R.S., Higgins R.N., Hommel S.F., et al. The validity and reliability of the exposure index as a metric for estimating the radiation dose to the patient. *Radiography (Lond)*. 2020; 26 (Suppl. 2): S94–9. <https://doi.org/10.1016/j.radi.2020.03.012>
11. Vodovатов A.V. Practical implementation of the diagnostic reference levels concept for the common radiographic examinations. *Radiatsionnaya gigiena*. 2017; 10(1): 47–55. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-1-47-55> (in Russian)
12. Vodovатов A.V., Golikov V.Yu., Kal'nitskiy S.A., Shatskiy I.G., Chipiga L.A. Evaluation of levels of exposure of adult patients from common radiographic examinations 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)
13. Korenkov I.P., Okhrimenko S.E., Samoylov A.S., Shestopalov N.V., Prokhorov N.I. A differentiated approach to hygienic indices in evaluating the activity of radiation facilities. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2019; 98(3): 256–60. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-3-256-260> (in Russian)
14. Okhrimenko S.E., Ilin L.A., Korenkov I.P., Morozov S.P., Biryukov A.P., Gombolevskiy V.A., et al. Optimization of radiation doses to patients in X-ray diagnostics. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2019; 98(12): 1331–7. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-12-1331-1337> (in Russian)
15. Taylor S., Van Muylem A., Howarth N., Gevenois P.A., Tack D. X-ray examination dose surveys: how accurate are my results? *Eur. Radiol*. 2019; 29(10): 5307–13. <https://doi.org/10.1007/s00330-019-06055-5>
16. Brindhaban A. Radiation dose to patients in coronary interventional procedures: a survey. *Radiat. Prot. Dosimetry*. 2019; 184(1): 1–4. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncy179>
17. Alukic E., Skrk D., Mekis N. Comparison of anteroposterior and posteroanterior projection in lumbar spine radiography. *Radiol. Oncol*. 2018; 52(4): 468–74. <https://doi.org/10.2478/raon-2018-0021>
18. Wachabauer D., Röthlin F., Moshammer H.M., Homolka P. Diagnostic Reference Levels for conventional radiography and fluoroscopy in Austria: Results and updated National Diagnostic Reference Levels derived from a nationwide survey. *Eur. J. Radiol*. 2019; 113: 135–9. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2019.02.015>
19. Alqahtani S.J.M., Welbourn R., Meakin J.R., Palfrey R.M., Rimes S.J., Thomson K., et al. Increased radiation dose and projected radiation-related lifetime cancer risk in patients with obesity due to projection radiography. *J. Radiol. Prot*. 2019; 39(1): 38–53. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/aaf1dd>
20. Druzhinina P., Eremina L., Vodovатов A., Shatskiy I. Patient doses from typical radiography examinations in the Leningrad region. In: *Proceedings of the 14th International Conference «Medical Physics 2019»*. Kaunas; 2019.
21. Golikov V.Yu., Chipiga L.A., Vodovатов A.V., Sarycheva S.S. Additions and changes in the assessment of effective doses of external radiation to patients in medical research. *Radiatsionnaya gigiena*. 2019; 12(3): 120–32. (in Russian)
22. Vodovатов A.V., Balonov M.I., Golikov V.Y., 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. *Radiat. Prot. Dosimetry*. 2017; 173(1–3): 223–32. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncw341>
23. Balonov M.I., Golikov V.Yu., Vodovатов A.V., Chipiga L.A., Zvonova I.A., Kal'nitskiy S.A., et al. Scientific bases of radiation protection in modern medicine. In: Balonov M.I., ed. *Radiation Diagnostics [Luchevaya diagnostika]*. St. Petersburg; 2019. (in Russian)