

Зависимость коэффициентов перехода к эффективной дозе от веса пациентов, подвергающихся рутинным рентгенологическим исследованиям

В.Ю. Голиков¹, А.В. Водоватов^{1,2}, Д.Д. Лаврешов³

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

² Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

На основе информации в отношении параметров проведения рутинных рентгенологических процедур были рассчитаны значения коэффициентов перехода к эффективной дозе у пациента различного веса. Численные значения коэффициентов перехода соответствуют значениям эффективной дозы при проведении данного рентгенографического исследования, полностью определяемого набором технических, геометрических и дозиметрических параметров, нормированным на значение поглощенной дозы в воздухе на расстоянии 1 м от фокуса трубки (K_e , мкЗв/мГр), либо на значение произведения дозы на площадь, измеренное за время проведения исследования (K_d , мкЗв/(сГр·см²)). Показано, что коэффициенты K_e обладают большим относительным разбросом своих значений, чем коэффициенты K_d . Внутри каждой весовой группы пациентов значение коэффициента K_d для пациента стандартного веса $K_d(W^{cm})$, может быть преобразовано к значению для пациента другого веса $K_d(W^{pac})$. Кроме того, экстраполяция расчетных значений K_d до веса младенцев значительно ниже веса 2,6 кг (вплоть до веса 0,6 кг), т.е. для недоношенных младенцев, дает удовлетворительные оценки значения K_d .

Ключевые слова: рентгенологические исследования, коэффициенты перехода, эффективная доза, пациенты.

Введение

При проведении медицинского исследования с использованием ионизирующего излучения необходимо оценить значение эффективной дозы у пациента¹. Эффективная доза – величина, используемая в качестве меры риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их радиочувствительности² [1]. Определение значения эффективной дозы на практике представляет значительные сложности, так как она не может быть измерена и требует проведения сложных расчетов.

Исходные данные для расчета эффективной дозы облучения пациентов при проведении рутинных рентгенологических исследований должны включать:

- технические параметры проведения исследования (напряжение на аноде рентгеновской трубки, толщина и материал фильтра);

- геометрические характеристики рентгенологического исследования (область исследования, размеры поля облучения, геометрия облучения);

- дозиметрические характеристики рентгенологического исследования (радиационный выход рентгеновского излучателя и экспозиция (количество электричества) или значение произведения дозы на площадь (ПДП), измеренное с помощью проходной ионизационной камеры).

В работе [2] на основе опубликованных литературных данных нами были разработаны и представлены зависимости коэффициентов перехода от ПДП к эффективной дозе от веса пациентов для ряда рентгенологических исследований.

Цель исследования – более тщательное изучение аналогичной зависимости для рутинных рентгенологических исследований трех областей тела: черепа и шеи, грудной клетки и брюшной полости и таза.

¹МУ 2.6.1.2944-11. Контроль эффективных доз облучения пациентов при медицинских рентгенологических исследованиях. М.: Роспотребнадзор, 2011. 40 с. [MU 2.6.1.2944-11. Control of the effective patient doses from medical X-ray examinations. M. Rosпотребнадzor. 2011. 40 p. (In Russ.)]

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

Голиков Владислав Юрьевич

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

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

Задачи исследования

1. Подтверждение установленной в [2] весовой зависимости коэффициентов перехода.

2. Оценка разброса значений коэффициента перехода с целью установления возможности использования его среднего значения, например, в качестве репрезентативной величины для оценки риска проведения медицинских процедур в данной области тела.

Были рассчитаны значения коэффициентов перехода, позволяющие определить эффективные дозы облучения пациентов различного возраста для рентгенографических процедур, выполняемых в областях черепа и шеи, грудной клетки, и брюшной полости и таза. Численные значения коэффициентов перехода соответствуют значениям эффективной дозы при проведении данного рентгенографического исследования, полностью определяемого набором технических, геометрических и дозиметрических параметров, нормированным на значение поглощенной дозы в воздухе на расстоянии 1 м от фокуса трубки (K_e , мкЗв/мГр), либо на значение ПДП, измеренное за время проведения исследования (K_d , мкЗв/(сГр·см²)).

Материалы и методы

Значения эффективных доз рассчитывались с помощью компьютерной программы EDEREX (Effective Dose Estimation at Roentgen Examinations) [3]. Расчеты эффективной дозы в соответствии с ее определением (Публикация № 60 МКРЗ) проводились для условного человека, имеющего полный набор мужских и женских органов. В качестве расчетных моделей тела пациента были использованы антропоморфные гетерогенные фантомы тела взрослого человека, а также детей в возрасте: новорожденного, 1, 5, 10 и 15 лет, рекомендованные в качестве «стандартных» для проведения такого рода расчетов (табл. 1) [4].

Таблица 1

Параметры расчетной модели «стандартного» человека

[Table 1

Parameters of the calculation model of a “standard” person]

Возраст, лет [Age, years]	Вес, кг [Weight, kg]	Рост, см [Height, cm]	Размеры торса, см [Torso dimensions, cm]	
			Передне-задний [Anterior-posterior]	Боковой [Lateral]
0	3,5	51,5	9,8	12,7
1	9,3	75	13	17,6
5	19	109	15	22,9
10	31,9	138,6	16,8	27,8
15	54,4	164	19,6	34,5
Взрослый [Adult]	71,1	174	20	40

Значения коэффициентов перехода K_e и K_d для рентгенографических процедур рассчитывались для следующих возрастных (весовых) групп пациентов: – от новорожденного до полугода; – от полугода до двух лет; – от двух лет до семи лет; – от семи лет до двенадцати лет; – от двенадцати лет до семнадцати лет; семнадцать лет и старше (взрослые).

Использовали следующие проекции процедур (см. рис. 1): – передне-задняя; – задне-передняя; – левая боковая; – правая боковая.

Размеры полей рентгеновского излучения в зависимости от возраста (веса) пациента варьировались от 5×8 см до 40×35 см, а напряжения на аноде рентгеновской трубки – от 50 до 120 кВ. При этом, в расчетах использовалось одно значение расстояния от фокуса трубки-приемника изображения (РИП=100 см) и одно значение фильтрации рентгеновского излучения (3,5 мм Al).



Рис. 1. Проекция проведения процедур: передне-задняя проекция; задне-передняя проекция; левая боковая проекция; правая боковая проекция

[Fig. 1. Projections for performing procedures: anterior-posterior projection; posterior-anterior projection; left lateral projection; right lateral projection]

В списке исследований, проводимых в областях черепа и шеи, грудной клетки, брюшной полости и таза для каждого возраста (веса) пациента было 38, 31 и 34 наименований соответственно. Это наибольшее количество исследований в этих областях тела пациента, известное нам из литературы. Так, например, в МУ 2.6.1.2944-11 для взрослого пациента указано только 11 наименований исследований для грудной клетки. Такое большое количество исследований позволяет оценить разброс значений коэффициентов K_e и K_d относительно среднего значения, который можно считать близким к максимально возможному разбросу из-за столь большого перечня исследований.

Результаты и обсуждение

На рисунках 2 и 3, 4 и 5, 6 и 7 представлены средние значения коэффициентов K_e и K_d для каждой весовой (возрастной) группы пациентов, для всех процедур, проводимых в области черепа и шеи, грудной клетки и брюшной полости и таза. Там же показан их разброс в пределах одного среднеквадратического отклонения ($\pm$ СКО), обусловленный различием параметров проведения процедур.

Видно, что коэффициенты K_e обладают большим относительным разбросом своих значений (СКО~55%), чем коэффициенты K_d (СКО~30%). По-видимому, это связано с тем, что коэффициенты K_e нормированы на значение поглощенной дозы в точке в воздухе вне объекта, т.е. не учитывают размеры поля излучения, падающего на объект (пациента), тогда как коэффициенты K_d учитывают размеры поля излучения, падающего на тело пациента. В первом случае коэффициент (K_e) связан с характеристикой поля вне объекта, а во втором (K_d) – с характеристикой поля, падающего на объект. Кроме того, разброс значений коэффициента K_e (> 50%), не позволяет использовать его, например, для упрощенной оценки радиационного риска, когда множество процедур в рассматриваемой области тела заменяется одной, репрезентативной [5].

Таким образом, при оценке значений эффективной дозы необходимо использовать коэффициенты K_d .

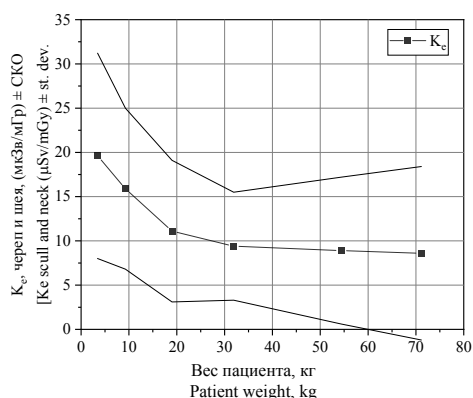


Рис. 2. Средние значения коэффициентов перехода K_e ($\pm$ СКО) для пациентов различного веса при проведении рентгенографии органов черепа и шеи

[Fig. 2. Average values of conversion coefficients K_e ($\pm$ SD) for patients of different weights during radiography of the skull and neck]

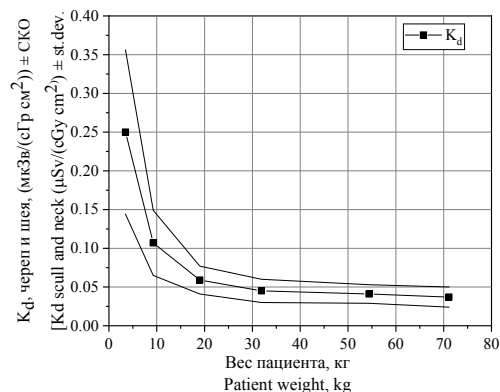


Рис. 3. Средние значения коэффициентов перехода K_d ($\pm$ СКО) для пациентов различного веса при проведении рентгенографии органов черепа и шеи

[Fig. 3. Average values of the conversion coefficients K_d ($\pm$ SD) for patients of different weights during radiography of the skull and neck]

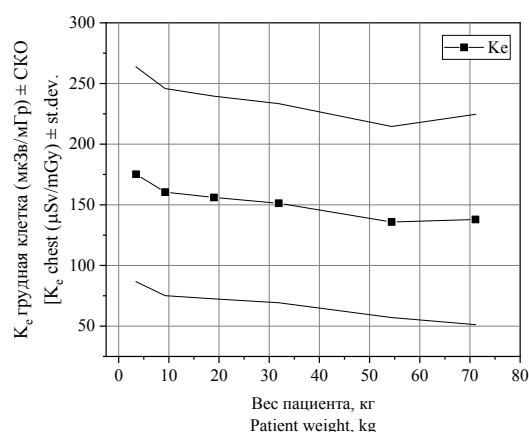


Рис. 4. Средние значения коэффициентов перехода K_e ($\pm$ СКО) для пациентов различного веса при проведении рентгенографии органов грудной клетки

[Fig. 4. Mean values of conversion coefficients K_e ($\pm$ SD) for patients of different weights during chest radiography]

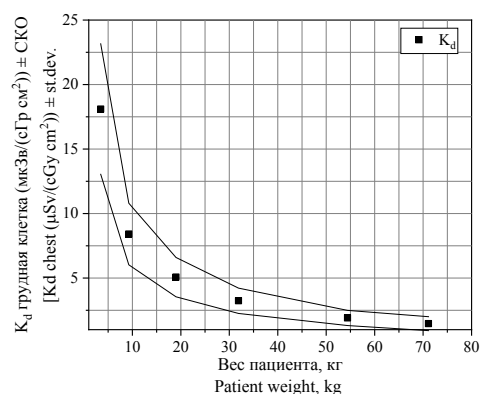


Рис. 5. Средние значения коэффициентов перехода K_d ($\pm$ СКО) для пациентов различного веса при проведении рентгенографии органов грудной клетки

[Fig. 5. Mean values of the conversion coefficients K_d ($\pm$ SD) for patients of different weights during chest radiography]

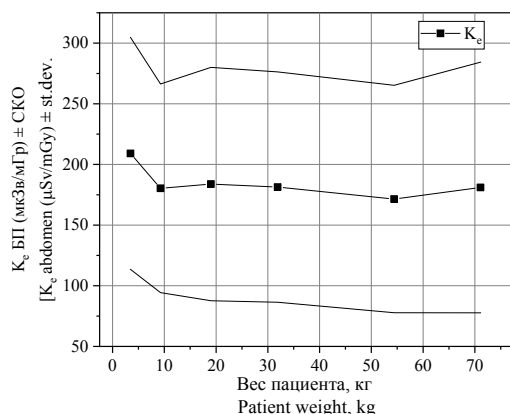


Рис. 6. Средние значения коэффициентов перехода K_e ($\pm$ СКО) для пациентов различного веса при проведении рентгенографии органов брюшной полости и таза
[Fig.6. Average values of conversion coefficients K_e ($\pm$ SD) for patients of different weights during radiography of abdominal and pelvic organs]

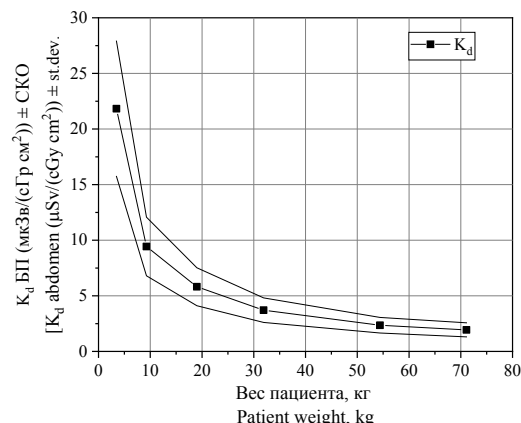


Рис. 7. Средние значения коэффициентов перехода K_d ($\pm$ СКО) для пациентов различного веса при проведении рентгенографии органов брюшной полости и таза
[Fig.7. Average values of conversion coefficients K_d ($\pm$ SD) for patients of different weights during radiography of abdominal and pelvic organs]

Внутри каждой весовой группы пациентов значение коэффициента K_d для пациента стандартного веса $K_d(W^{cr})$

(см. табл. 1) может быть преобразовано к значению для пациента другого веса $K_d(W^{cr})$ согласно формуле [2].

$$K_d(W^{naq}) = K_d(W^{cm}) \cdot \frac{(1 - \exp(-0,7 \cdot \sqrt[3]{W^{naq}}))}{(1 - \exp(-0,7 \cdot \sqrt[3]{W^{cm}}))} \cdot \frac{W^{cm}}{W^{naq}}, \text{ мкЗв/(сГр} \cdot \text{см}^2)$$

Формула справедлива при разбросе веса пациентов в каждой весовой группе от значения 2,5 % до значения 97,5 %, указанных в таблице 2 [6], для всех рассмотренных областей и проекций облучения.

Кроме того, экстраполяция расчетных значений K_d до веса младенцев значительно ниже веса 2,6 кг (вплоть до веса 0,6 кг), т.е. для недоношенных младенцев, дает удовлетворительные оценки значения K_d , что подтверждается прямыми расчетами методом Монте Карло (см. рис. 8) [7]. Верификационных данных в области веса более 120 кг нами найдено не было.

Заключение

На основе информации в отношении параметров проведения рутинных рентгенологических процедур были рассчитаны значения коэффициентов перехода к эффективной дозе у пациента различного веса. Численные значения коэффициентов перехода соответствовали значениям эффективной дозы при проведении рентгенографического исследования в данной области тела, полностью определяемого набором технических, геометрических и дозиметрических параметров, нормированным на значение поглощенной дозы в воздухе на расстоянии 1 м от фокуса трубки (K_e , мкЗв/(мГр·м²)) либо на значение ПДП, измеренное за время проведения исследования (K_d , мкЗв/(сГр·см²)).

Таблица 2

Разброс значений веса пациентов в различных возрастных категориях

[Table 2]

Variation in patient weight values in different age categories]

Возраст, лет [Age, years]	Вес стандартного пациента, кг [Standard patient weight, kg]	Вес пациента, кг [Patient weight, kg]	
		2,5 %	97,5 %
0	3,5	2,6	4,3
1	9,3	7,9	12,1
5	19	14,7	24,1
10	31,9	23,3	48,0
15	54,4	43,3	82,8
Взрослый [Adult]	71,1	40	120

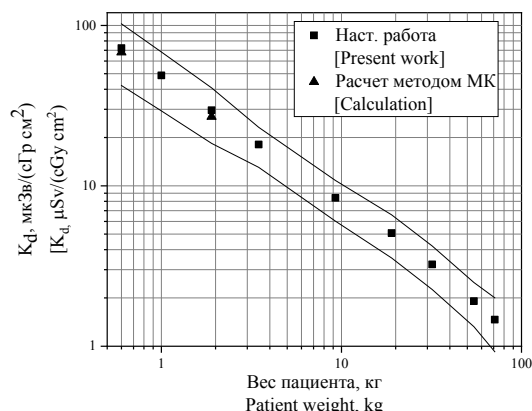


Рис. 8. Средние значения коэффициентов перехода K_d ($\pm$ СКО) для пациентов различного веса при проведении рентгенографии органов грудной клетки и их экстраполяция к значениям веса недоношенных младенцев

[Fig.8. Mean values of K_d conversion factors ($\pm$ SD) for patients of different weights during chest radiography and their extrapolation to weight values of premature infants]

Показано, что коэффициенты K_e обладают большим относительным разбросом своих значений и хуже коррелируют с весом пациента, чем коэффициенты K_d . Внутри каждой весовой группы пациентов значение коэффициента K_d , указанное в таблице для пациента стандартного веса $K_d(W^{ct})$, может быть преобразовано к значению для пациента другого веса $K_d(W^{nat})$ согласно формуле, предложенной нами ранее в работе [3]. Кроме того, экстраполяция расчетных значений K_d до веса младенцев значительно ниже веса 2,6 кг (вплоть до веса 0,6 кг), то есть для недоношенных младенцев, дает удовлетворительные оценки значения K_d .

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Голиков В.Ю. – идея и руководство исследованием, написание рукописи и представление окончательного варианта статьи в редакцию журнала.

Водоватов А.В. – анализ данных и редакция промежуточного варианта статьи.

Лаврешов Д.Д. – обеспечил привлечение финансирования, предоставил исходные данные.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Литература

1. Международное Агентство по Атомной Энергии. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности. Серия норм МАГАТЭ по безопасности. Вена, IAEA, 2015. № GSR Part 3. 518 с.
2. Golikov V., Druzhinina P. Technical Note: Patient-weight dependence of the effective dose conversion coefficients for diagnostic x-ray imaging procedures // Medical Physics. 2020. Vol. 47, No 10. P. 5366-5372. DOI:10.1002/mp.14446.
3. Golikov V., Barkovsky A., Wallström E., Cederblad Å. A comparative study of organ doses assessment for patients undergoing conventional X-ray examinations: phantom experiments vs. calculations // Radiation Protection Dosimetry. 2018. Vol. 178, No 2. P. 223-234.
4. Cristy M. Mathematical Phantoms Representing Children of Various Ages for Use in Estimates of Internal Dose (Oak Ridge: National Laboratory). 1980, ORNL/ NUREG/TM-367.
5. Golikov V., Vodovатов A., Chipiga L., Shatsky I. Practical guidance on the assessment of radiation risks for diagnostic radiological examinations // Journal of Radiology Protection. 2024. No 44. P. 031514. DOI: 10.1088/1361-6498/ad72fd.
6. Chapple C.L. The optimization of radiation dose in paediatric radiology. Thesis submitted for the degree of PhD at the Faculty of Medicine University of Newcastle upon Tyne. Newcastle university library, 098 265 6, Medical Thesis L6425, 1998.
7. Smans K., Tapiovaara M., Cannie M. et al. Calculation of organ doses in x-ray examinations of premature babies // Medical Physics. 2008. No 35. P. 556.

Поступила: 04.02.2025

Голиков Владислав Юрьевич – старший научный сотрудник, лаборатория радиационной гигиены медицинских организаций, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: sg235@rambler.ru
ORCID: 0009-0003-5494-2300

Водоватов Александр Валерьевич – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; доцент кафедры общей гигиены Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0000-0002-5191-7535

Лаврешов Дмитрий Денисович – аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0009-0006-4791-7678

Для цитирования: Голиков В.Ю., Водоватов А.В., Лаврешов Д.Д. Зависимость коэффициентов перехода к эффективной дозе от веса пациентов, подвергающихся рутинным рентгенологическим исследованиям // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 1. С. 70–75. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-70-75

Effective dose conversion coefficients as a function of patient weight for routine X-ray examination

Vladislav Yu. Golikov¹, Aleksandr V. Vodovатов^{1,2}, Dmitry D. Lavreshov³

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

² Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Saint Petersburg, Russia

³ Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

Based on the information regarding the parameters of routine radiographic procedures the values of the conversion coefficients to the effective dose in patients of different weights were calculated. The numerical values of the conversion coefficients correspond to the effective dose values during a given radiographic examination, which is completely determined by a set of technical, geometric, and dosimetric parameters normalized to the absorbed dose value in the air at a distance of 1 m from the tube focus (K_a , $\mu\text{Sv/mGy}$), or to the dose-area product value measured during the examination (K_d , $\mu\text{Sv}/(\text{cGy cm}^2)$). It is shown that the K_e factors have a greater relative spread of their values than the K_d factors. Within each weight group of patients, the K_d factor value for a patient of standard weight can be converted to the value for a patient of different weight. Furthermore, extrapolation of the calculated K_d values to infant weights well below 2.6 kg (down to 0.6 kg), i.e. for premature infants, yields satisfactory estimates of the K_d value.

Key words: X-ray examinations, conversion coefficients, effective dose, patients.

Authors' personal contribution

Golikov V.Yu. – idea and guidance of the study, manuscript writing and submission of the final version of the manuscript to the journal editorial board.

Vodovатов A.V. – data analysis and revision of the intermediate version of the manuscript.

Lavreshov D.D. – secured funding, provided initial data.

Conflict of interests

Authors declare no conflict of interest.

Sources of funding

The study was not supported by sponsorship.

References

1. BSS. International Atomic Energy Agency, Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, IAEA; 2014.
2. Golikov V, Druzhinina P. Technical Note: Patient-weight dependence of the effective dose conversion coefficients for diagnostic x-ray imaging procedures. *Medical Physics*. 2020;47(10): 5366-5372. DOI:10.1002/mp.14446.
3. Golikov V, Barkovsky A, Wallström E, Cederblad Å. A comparative study of organ doses assessment for patients undergoing conventional X-ray examinations: phantom experiments vs. calculations. *Radiation Protection Dosimetry*. 2018;178(2): 223-234.
4. Cristy M. Mathematical Phantoms Representing Children of Various Ages for Use in Estimates of Internal Dose (Oak Ridge: National Laboratory). ORNL/ NUREG/TM-367; 1980.
5. Golikov V, Vodovатов A, Chipiga L, Shatsky I. Practical guidance on the assessment of radiation risks for diagnostic radiological examinations. *Journal of Radiology Protection*. 2024;44: 031514 DOI: 10.1088/1361-6498/ad72fd.
6. Chapple CL. The optimization of radiation dose in paediatric radiology. Thesis submitted for the degree of PhD at the Faculty of Medicine University of Newcastle upon Tyne. Newcastle University Library, 098 265 6. *Medical Thesis* L6425; 1998.
7. Smans K, Tapiovaara M, Cannie M, Struelens L, Vanhavere F, Smet M, Bosmans H. Calculation of organ doses in x-ray examinations of premature babies. *Medical Physics*. 2008;35: 556.

Received: February 04, 2025

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

ORCID: 0009-0003-5494-2300

Aleksandr V. Vodovатов – Candidate of Biological Sciences, Head of Laboratory, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; Docent, Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0002-5191-7535

Dmitry D. Lavreshov – Postgraduate Student of Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0009-0006-4791-7678

For citation: Golikov V.Yu., Vodovатов A.V., Lavreshov D.D. Effective dose conversion coefficients as a function of patient weight for routine X-ray examination. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 1, P. 70–75. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-70-75

Vladislav Yu. Golikov

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

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