

М.В. Осипов¹, F. Ria², П.С. Дружинина³, М.Э. Сокольников¹

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОГЛОЩЕННЫХ ДОЗ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО И ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ОБЛУЧЕНИЯ У ПАЦИЕНТОВ, ОБСЛЕДОВАННЫХ МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

¹Южно-Уральский институт биофизики ФМБА России, Озёрск

²Университет Дюка, 27708, Северная Каролина, Дарем, США

³Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены им. профессора П.В. Рамзаева, Санкт-Петербург

Контактное лицо: М.В. Осипов, e-mail: osipov@subi.su

РЕФЕРАТ

В статье приводится сравнительная оценка поглощённых доз, полученных при проведении рентгеновской компьютерной томографии (КТ), с дозами производственного облучения работников производственного объединения «Маяк» (ПО «Маяк»). Дозы диагностического облучения пациентов, обследованных при помощи КТ, были реконструированы методом Монте-Карло с использованием 58 виртуальных взрослых фантомов для 13 категорий различных протоколов КТ-исследований. Для реконструкции поглощённых доз на органы и ткани использовались архивные записи исследований пациентов в формате DICOM, из которых была извлечена информация о параметрах сканирования. Идентификация пациентов среди лиц, имевших производственный контакт с источниками ионизирующего излучения, была выполнена по регистру персонала ПО «Маяк». Данные о годовых дозах производственного облучения работников ПО «Маяк» были получены из базы данных дозиметрической системы «Доза-2013».

В результате проведённого исследования была собрана информация из 303 протоколов исследований 212 пациентов, среди которых идентифицировано 42 работника ПО «Маяк», из них 24 имели данные о дозах внешнего производственного гамма-облучения, и 16 человек – о дозе внутреннего облучения. Было произведено сравнение индивидуальных поглощённых доз пациентов в результате воздействия рентгеновского излучения при компьютерной томографии с дозами профессионального облучения.

Анализ полученных результатов показал значительную вариабельность величины поглощённой дозы в органах и тканях пациента в результате проведения компьютерной томографии в зависимости от исследуемой области. Наибольшая доза облучения при КТ была получена пациентами при исследовании области головы, при этом среднее значение поглощённой дозы в головном мозге за одно исследование составило 24,5 мГр (максимальное значение накопленной дозы 82,3 мГр), в хрусталике глаза – 27,7 мГр (максимальное значение накопленной дозы 92,9 мГр).

Выполнено сравнение величины поглощённой дозы в органах и тканях пациентов, полученной в результате диагностического и производственного облучения, накопленной в течение одного года. Показано, что среднее значение накопленной дозы, поглощённой в органах и тканях пациента при проведении компьютерной томографии, было на порядок ниже аналогичной годовой дозы производственного внешнего гамма-облучения персонала ПО «Маяк», за исключением головного мозга, годовой КТ-эквивалент дозы внешнего гамма-излучения для которого составил 2,82.

Ключевые слова: компьютерная томография, рентгеновское излучение, профессиональное облучение, поглощённая доза, ПО «Маяк», персонал

Для цитирования: Осипов М.В., Ria F., Дружинина П.С., Сокольников М.Э. Сравнительная оценка поглощённых доз производственного и диагностического облучения у пациентов, обследованных методом компьютерной томографии // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2023. Т. 68. № 1. С. 48–57. DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-1-48-57

M.V. Osipov¹, F. Ria², P.S. Druzhinina³, M.E. Sokolnikov¹

Comparative Assessment of the Absorbed Doses Resulted from Occupational Exposure and Computed Tomography

¹Southern Urals Biophysics Institute, Ozyorsk, Russia

²Duke University, North Caroline, Durham, US

³P.V. Ramzaev Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene, Saint Petersburg, Russia

Contact person: M.V. Osipov, e-mail: osipov@subi.su

ABSTRACT

A comparative assessment of the absorbed doses resulted from computed tomography (CT) examinations, and the dose resulted from occupational external gamma exposure of the “Mayak” workers was carried out. The patients’ diagnostic radiation dose was reconstructed using Monte-Carlo simulation on a population of 58 virtual adult phantoms across 13 CT protocol categories. Archival records of CT examinations of patients were used for the dose reconstruction. Information on technical parameters of scanning was extracted from DICOM files.

The study sample has been linked to the Mayak worker register database to identify persons who had professional contact with ionizing radiation. Annual occupational dose records for the Mayak workers were obtained from the Dose-2013 dosimetry system.

In this study, information on 212 patients was collected from 303 records. Among them, 42 Mayak employees were identified, including 24 persons who had non-zero dose of external gamma radiation, and 16 persons with internal alpha radiation dose due to occupational intake of ^{239}Pu . Individual doses absorbed in the organs resulted from exposure to computed tomography and occupational activities has been compared.

The results showed significant variability of the absorbed organ dose depending on the area of CT examination. The brain and lens were subjected to the highest radiation exposure during head CT. The average absorbed dose in brain was 24.5 mGy per single examination (the maximum brain dose accumulated over the entire study period was 82.3 mGy), and 27.7 mGy for the lens of the eye (the maximum lens dose reached 92.9 mGy).

Relevant comparison of the absorbed dose of diagnostic and occupational exposure, accumulated during one year, has been performed. The average estimate of cumulative radiation dose absorbed in the organs during computed tomography was an order of magnitude lower than the one from occupational external gamma exposure of Mayak personnel, except brain dose. Annual CT dose equivalent of external gamma radiation was 2.82.

Keywords: *computed tomography, X-ray, occupational exposure, absorbed dose, "Mayak" PA, employees*

For citation: Osipov MV, Ria F, Druzhinina PS, Sokolnikov ME. Comparative Assessment of the Absorbed Doses Resulted from Occupational Exposure and Computed Tomography. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2023;68(1):48–57. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-1-48-57

Введение

На сегодняшний день рентгеновская компьютерная томография (далее КТ) является одним из ведущих методов лучевой диагностики, который завоевал популярность практически во всех областях медицины за счет высокой скорости проведения исследований и исключительной информативности [1]. Стремительный рост количества исследований с использованием КТ наблюдается во всём мире, и Российская Федерация входит в число стран, где этот метод диагностики активно применяется на протяжении более трёх десятилетий [2]. При этом, только за период с 2017 по 2021 г. в Челябинской области вклад КТ в коллективную дозу от всех видов лучевой диагностики (рис.1) увеличился в 2 раза, и составил 80 % [3].

Значительный рост использования компьютерной томографии в последние годы обусловлен пандемией новой коронавирусной инфекции SARS-Cov-2, в связи с высокой эффективностью метода при диагностике поражения лёгких, являющегося наиболее значимым клиническим проявлением при заболевании COVID-19 [3]. Так, в 2021 г. в России было проведено более 27 млн КТ-исследований [4], что на 5,8 млн исследований больше, чем в 2020 г. (рис. 1).



Рис. 1. Динамика изменения числа процедур и изменение вклада в коллективную дозу компьютерной томографии в Челябинской области за период 2017–2021 гг.

Fig. 1. Dynamics of changes in the number of CT examinations and its contribution to the collective dose in the Chelyabinsk region for the period 2017–2021

Отдавая должное высокой клинической востребованности данного метода лучевой диагностики, необходимо помнить, что обследование пациентов с использованием КТ может сопровождаться значительными дозами

облучения [5]. Так, в некоторых случаях эффективная доза за одно исследование может превышать 100 мЗв [6], а в результате проведения неоднократных (повторных) исследований достигать 500 мЗв [7]. Принимая во внимание потенциальные риски, связанные с воздействием ионизирующего излучения на организм человека [8–10], необходим строгий учёт и контроль индивидуальной дозы облучения при компьютерной томографии ввиду возможных отдалённых последствий для здоровья пациентов [11, 12]. При этом необходимо фиксировать не только сам факт облучения пациента, а осуществлять дальнейшее наблюдение за данными лицами, что позволит учесть накопленную дозу, полученную в результате проведения последующих исследований в течение всей жизни пациента, и отследить дальнейшее изменение состояния здоровья пациента, подвергшегося воздействию ионизирующего излучения.

Данная проблема особенно актуальна для лиц, которые испытывают повышенную дозовую нагрузку по сравнению с остальным населением за счёт профессионального воздействия ионизирующего излучения, и, следовательно, могут подвергаться более высокому потенциальному риску развития канцерогенных эффектов [13, 14]. Допустимые пределы производственного облучения для таких лиц регламентированы действующими Нормами радиационной безопасности на уровне менее 20 мЗв за любые последовательные 5 лет для персонала группы «А». При этом, на фоне постепенного снижения среднего уровня доз производственного облучения персонала радиационно-опасных предприятий в РФ, за период с 2017 по 2018 гг. наблюдается рост годовой индивидуальной эффективной дозы (ЭД) облучения [2]. Однако сравнение доз производственного и диагностического облучения с использованием эффективной дозы достаточно условно, поскольку сценарии диагностического и профессионального облучения являются в большинстве случаев локальными, в связи с чем при одной и той же величине эффективной дозы распределение поглощённых доз в органах и тканях может существенно различаться [15]. Оценка распределения поглощённой дозы облучения пациента при КТ-исследовании позволяет определить критические органы и ткани, которые подвергаются наибольшему потенциальному риску возникновения радиационно-индуцированных эффектов.

Таким образом, существует необходимость оценки дозы рентгеновского диагностического облучения при

проведении КТ в распределении по органам и тканям, и сравнения с дозой, накопленной в результате производственной деятельности. Исходя из этого, целью работы является расчёт и сравнительная оценка поглощённых доз в органах и тканях пациентов, обследованных при помощи КТ, и доз профессионального облучения работников ПО «Маяк».

Материал и методы

Исследование проведено ретроспективно. В исследуемую группу были включены пациенты, обследованные при помощи КТ в ГБУЗ «Районная больница г. Касли» (КРБ) в период с 1 января 2009 г. по 31 декабря 2019 г. Все обследованные являлись жителями Озёрского городского округа (ОГО), обеспечивающего функционирование предприятия ядерно-промышленного комплекса ПО «Маяк», персонал которого подвергается профессиональному воздействию ионизирующего излучения от внешних и внутренних источников. Исследуемая группа имела примерно равное соотношение мужчин (46 %) и женщин (54 %). Возраст обследованных варьировал от 8 до 85 лет (средний возраст 52,5 года), количество лиц в возрасте менее 18 лет составило 6 человек. Более детально информация о дизайне исследования, возрастном-половом составе и прочих характеристиках исследуемой группы представлена в предыдущей работе [16].

Дата начала наблюдения соответствовала вводу в эксплуатацию в КРБ компьютерного томографа Somatom Spirit фирмы Siemens (ФРГ). Дата окончания наблюдения соответствует дате последнего уточнения жизненного статуса обследованных пациентов согласно данным отдела муниципальной статистики ОГО. Интервал времени под наблюдением для каждого пациента вычислялся от даты первого исследования до даты окончания наблюдения или даты смерти, в зависимости от того, какое событие наступило раньше. В течение периода наблюдения фиксировалось количество исследований, выполненных пациентам с использованием КТ, протокол исследования, а также дозовые характеристики проведённых исследований. Критерием исключения пациента из анализа являлось отсутствие полной дозовой информации о проведённых КТ-исследованиях.

Источником данных для реконструкции дозы являлись архивные записи КТ-исследований пациентов в формате DICOM, из которых извлекались следующие параметры сканирования: возраст пациента на момент исследования, пол пациента, исследуемая область, протокол исследования, диаметр фантома, напряжение на трубке (Кв), экспозиция (мАс), объёмный компьютерно-томографический индекс дозы ($CTDI_{vol}$) и его произведение на общую протяженность сканирования (DLP). Для многофазных исследований учитывалось количество серий сканирования. Значение параметра модуляции силы тока было установлено на уровне 0,5 для всех исследований.

Реконструкция поглощённой дозы в органах и тканях (ОД), полученной пациентами при проведении КТ, выполнялась методом Монте-Карло, описанном в исследовании [17]. Оценки поглощённой дозы были получены на основе математического моделирования для набора из 58 эталонных виртуальных фантомов (библиотека фантомов ХСАТ, 18–78 лет, 52–117 кг, 23/35 М/Ж) для 13 категорий различных протоколов исследования. В частности, все исследования в данной группе были разделены на семь общих протоколов: голова, голова и шея, плечо, грудь, живот, таз и колено. В качестве допол-

нительного входного параметра при оценке доз на органы использовался эффективный диаметр частей тела пациента. В частности, для исследований головы и шеи был выбран эталонный диаметр 18 см, а для туловища использовалось значение диаметра 29 см и 28 см для мужчин и женщин соответственно [18]. Величина накопленной дозы на орган в результате всех исследований каждого пациента $D(o)_{cum}$ вычислялась по формуле:

$$D(o)_{cum} = \sum_{i=1} D_i, \quad (1)$$

где $D(o)_{cum}$ – величина накопленной поглощённой органной дозы на орган за все исследования,

D_i – доза на орган за каждое i -ое исследование.

Для лиц, имевших в течение периода наблюдения единственный эпизод диагностического облучения при КТ, доза облучения $D(o)_{cum}$ считалась равной годовой дозе облучения. Полученное значение годовой поглощённой дозы облучения пациента сравнивалось с допустимыми пределами индивидуальных доз облучения органов и тканей населения и персонала, приведёнными в Публикации 103 МКРЗ [19].

Для оценки дозы производственного облучения была произведена идентификация пациентов исследуемой группы в регистре персонала основных производств ПО «Маяк» [20]. Источником информации о дозах производственного облучения для идентифицированных пациентов являлась база данных дозиметрической системы «Доза-2013» [21]. Методика реконструкции дозы внешнего и внутреннего облучения персонала описана в публикациях [22, 23].

Статистический анализ данных был выполнен с использованием статистического пакета Stata версии 12.0 [24]. Для средних величин указывалась стандартная погрешность среднего (s.e.):

$$s.e. = \frac{s_x}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

где n – объём выборки, s_x – стандартное отклонение выборочного среднего, рассчитанное по формуле:

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - M)^2}{n-1}}, \quad (3)$$

где $\sum_{i=1}^n (x_i - M)^2$ – дисперсия, x_i – значение каждого измерения, M – среднее арифметическое измеренных значений.

Для сравнительной оценки нормально распределённых величин ($n > 100$) использовалось среднее значение и границы 95 % доверительного интервала (ДИ 95 %). Для обработки данных малых выборок ($n < 100$) с учётом характера распределения величины поглощённой дозы, отличного от нормального, использовались непараметрические оценки – медиана, интерквартильные интервалы, максимальное и минимальное значения.

Сравнение полученных величин поглощённой дозы от различных источников облучения было выполнено с учётом интервала времени накопления дозы. Среднее значение величины поглощённой дозы внешнего производственного облучения (\bar{r}) для работников ПО «Маяк» вычислялось с учётом длительности профессионального маршрута. Для лиц, находившихся в контакте с производственным облучением в течение нескольких последовательных лет работы на радиационно-опасном производстве, нормированная величина суммарной дозы, поглощённой в данном органе/ткани $D(o)_r$, вычислялась согласно формуле:

$$D(o)_t = \frac{\sum_{i=1}^n D(o)_i}{t_n - t_1}, \quad (4)$$

где $D(o)_i$ – величина поглощённой органной дозы для каждого i -ого года профессионального облучения, t_n – дата последнего эпизода облучения, t_1 – дата первого эпизода облучения.

Результаты

Дозы облучения пациентов при компьютерной томографии

Реконструированные значения поглощённых доз в результате проведённых КТ-исследований пациентов, выполненных с использованием сканера Somatom Spirit, представлены табл. 1–4.

Таблица 1

Распределение поглощённой дозы (мГр) на органы и ткани пациентов при однократном исследовании головного мозга (n=125)

Distribution of absorbed organ doses of patients (mGy) due to single head CT (n=125)

Орган	Сред. зн.	Стд. откл.	Мин.	25 %	Медиана	75 %	Макс.
Красный костный мозг	1,81	0,02	0,18	1,67	1,80	1,97	2,32
Кости	5,48	0,07	0,55	5,08	5,48	5,99	7,04
Кожа	1,64	0,02	0,16	1,51	1,73	1,79	2,10
Головной мозг	24,53	0,35	2,46	22,76	24,54	26,86	31,56
Хрусталик	27,65	0,39	2,77	25,66	27,67	30,28	35,59
Глотка и гортань	0,86	0,01	0,09	0,79	0,85	0,93	1,1
Щитовидная железа	0,63	0,01	0,06	0,58	0,63	0,68	1,3
Трахея и бронхи	0,74	0,01	0,07	0,67	0,73	0,79	1,79
Пищевод	0,57	0,01	0,06	0,51	0,55	0,61	1,95
Лёгкие	0,73	0,01	0,07	0,67	0,72	0,79	2,15
Вилочковая железа	0,39	0,01	0,04	0,35	0,38	0,41	1,57
Молочные железы	0,61	0,01	0,06	0,56	0,60	0,66	1,37
Сердце	0,39	0,02	0,04	0,35	0,38	0,41	2,34
Печень	0,38	0,03	0,04	0,33	0,36	0,39	3,53
Желудок	0,33	0,03	0,03	0,28	0,30	0,33	3,40
Селезёнка	0,48	0,03	0,05	0,42	0,45	0,50	3,50
Толстая кишка	0,17	0,01	0,02	0,15	0,16	0,18	1,59
Надпочечники	0,20	0,02	0,02	0,16	0,17	0,19	2,74
Поджелудочная железа	0,18	0,02	0,02	0,15	0,16	0,18	2,93
Тонкая кишка	0,14	0,01	0,01	0,11	0,12	0,13	1,89
Почки	0,17	0,02	0,01	0,13	0,15	0,16	2,73
Желчный пузырь	0,16	0,03	0,01	0,13	0,14	0,15	3,40
Яичники	0,03	0,003	0,003	0,02	0,02	0,03	0,22
Матка	0,03	0,003	0,003	0,02	0,03	0,03	0,21
Влагалище	0,02	0,002	0,002	0,02	0,02	0,02	0,13
Мочевой пузырь	0,02	0,01	0,0	0,02	0,02	0,02	0,16
Предстательная железа	0,03	0,002	0,02	0,03	0,03	0,03	0,11
Семенники	0,06	0,001	0,04	0,05	0,06	0,06	0,07
ЭД, мЗв	0,97	0,17	0,10	0,89	0,95	1,04	1,92

Таблица 2

Распределение поглощённой дозы (мГр) на органы и ткани при однократном исследовании грудной клетки (n=69)

Distribution of absorbed organ doses of patients (mGy) due to single chest CT (n=69)

Орган	Сред. зн.	Стд. откл.	Мин.	25 %	Ме-диана	75 %	Макс.
Красный костный мозг	1,62	0,06	0,45	1,29	1,62	1,95	2,54
Кости	2,76	1,01	0,77	2,20	2,77	3,32	4,33
Кожа	1,03	0,04	0,29	0,82	1,04	1,25	1,63
Головной мозг	0,08	0,003	0,02	0,06	0,08	0,10	0,13
Хрусталик	0,06	0,002	0,02	0,05	0,06	0,07	0,10
Глотка и гортань	0,99	0,03	0,28	0,77	1,00	1,21	1,58
Щитовидная железа	3,58	0,12	1,00	2,87	3,57	4,28	5,59
Трахея и бронхи	5,21	0,18	1,45	4,16	5,21	6,26	8,18
Пищевод	4,78	0,17	1,33	3,84	4,77	5,73	7,48
Лёгкие	5,07	0,18	1,41	4,02	5,11	6,13	8,01
Вилочковая железа	5,37	0,19	1,49	4,26	5,41	6,49	8,48
Молочные железы	4,12	0,14	1,15	3,25	4,18	5,01	6,55
Сердце	4,72	0,16	1,31	3,73	4,77	5,72	7,47
Печень	2,31	0,08	0,64	1,81	2,35	2,82	3,68
Желудок	2,29	0,08	0,64	1,77	2,31	2,82	3,68
Селезёнка	2,28	0,08	0,63	1,80	2,31	2,78	3,63
Толстая кишка	0,23	0,001	0,07	0,18	0,24	0,29	0,39
Надпочечники	1,42	0,05	0,40	1,15	1,41	1,68	2,19
Поджелудочная железа	1,21	0,04	0,34	0,96	1,22	1,47	1,92
Тонкая кишка	0,29	0,01	0,08	0,23	0,30	0,36	0,47
Почки	0,67	0,02	0,19	0,54	0,66	0,79	1,03
Желчный пузырь	0,63	0,02	0,18	0,49	0,65	0,79	1,04
Яичники	0,01	0,001	0,004	0,01	0,01	0,01	0,02
Матка	0,01	0,001	0,003	0,008	0,01	0,01	0,02
Влагалище	0,004	2×10 ⁻⁴	0,001	0,003	0,004	0,005	0,006
Мочевой пузырь	0,006	2×10 ⁻⁴	0,002	0,005	0,006	0,007	0,01
Предстательная железа	0,004	2×10 ⁻⁴	0,001	0,003	0,004	0,005	0,007
Семенники	0,001	4×10 ⁻⁵	2×10 ⁻⁴	6×10 ⁻⁴	8×10 ⁻⁴	0,001	0,001
ЭД, мЗв	2,3	0,66	0,64	1,82	2,32	2,79	3,64

Таблица 3

Распределение поглощённой дозы (мГр) на органы и ткани при однократном исследовании брюшной полости и малого таза (n=125)

Distribution of absorbed organ doses of patients (mGy) due to single abdominal CT (n=125)

Орган	Сред. зн.	Стд. откл.	Мин.	25 %	Ме-диана	75 %	Макс.
1	2	3	4	5	6	7	8
Красный костный мозг	1,49	0,06	0,48	1,14	1,18	1,77	3,14
Кости	2,07	0,09	0,66	1,56	1,61	2,42	4,29
Кожа	1,06	0,05	0,34	0,82	0,83	1,25	2,21
Головной мозг	0,005	2×10 ⁻⁴	2×10 ⁻⁴	0,004	0,004	0,006	0,01
Хрусталик	0,01	2×10 ⁻⁴	2×10 ⁻⁴	0,004	0,004	0,006	0,01

Окончание таблицы 3

Окончание таблицы 4

1	2	3	4	5	6	7	8
Глотка и гортань	0,07	0,003	2×10 ⁻⁴	0,05	0,06	0,08	0,15
Щитовидная железа	0,14	0,007	3×10 ⁻⁴	0,11	0,12	0,16	0,31
Трахея и бронхи	1,05	0,05	0,02	0,86	0,87	1,20	2,31
Пищевод	1,98	0,09	0,03	1,62	1,63	2,25	4,34
Лёгкие	2,15	0,1	0,03	1,76	1,78	2,44	4,73
Вилочковая железа	0,73	0,04	0,01	0,60	0,60	0,83	1,60
Молочные железы	0,66	0,03	0,01	0,53	0,55	0,76	1,46
Сердце	3,29	0,16	0,04	2,66	2,74	3,70	7,28
Печень	7,82	0,38	0,25	6,25	6,57	8,67	17,47
Желудок	7,52	0,36	0,21	5,99	6,34	8,31	16,87
Селезёнка	7,65	0,37	0,19	6,14	6,41	8,52	17,04
Толстая кишка	3,95	0,17	1,28	3,03	3,16	4,43	8,39
Надпочечники	6,38	0,31	0,30	5,09	5,36	7,07	14,26
Поджелудочная железа	6,98	0,33	0,39	5,54	5,89	7,69	15,66
Тонкая кишка	4,75	0,21	1,58	3,69	3,89	5,12	10,34
Почки	6,78	0,32	0,75	5,36	5,72	7,44	15,20
Желчный пузырь	8,55	0,41	0,57	6,84	7,16	9,49	19,05
Яичники	0,57	0,17	0,09	0,21	0,21	0,36	7,54
Матка	0,55	0,19	0,07	0,17	0,17	0,29	8,27
Влагалище	0,36	0,16	0,02	0,06	0,06	0,10	6,87
Мочевой пузырь	0,41	0,2	0,04	0,09	0,10	0,15	8,40
Предстательная железа	0,27	0,14	0,03	0,05	0,05	0,07	6,91
Семенники	0,13	0,08	0,01	0,01	0,01	0,01	3,93
ЭД, мЗв	2,82	1,40	0,94	2,21	2,32	3,06	6,16

1	2	3	4	5	6	7	8
Молочные железы	2,24	0,22	0,01	0,60	1,07	2,42	20,49
Сердце	3,80	0,31	0,05	0,38	0,94	6,24	20,66
Печень	5,69	0,58	0,15	0,36	0,88	9,23	34,48
Желудок	5,47	0,56	0,13	0,30	0,75	8,99	33,29
Селезёнка	5,64	0,56	0,15	0,45	1,07	9,15	33,62
Толстая кишка	2,56	0,28	0,05	0,16	0,25	4,50	16,26
Надпочечники	4,41	0,47	0,08	0,18	0,43	6,98	28,14
Поджелудочная железа	4,71	0,52	0,11	0,16	0,49	7,65	30,92
Тонкая кишка	3,04	0,35	0,08	0,12	0,27	5,30	20,41
Почки	4,39	0,50	0,08	0,15	0,40	7,42	30,0
Желчный пузырь	5,46	0,64	0,09	0,14	0,42	9,34	37,61
Яичники	0,33	0,10	0,01	0,02	0,03	0,30	8,11
Матка	0,32	0,11	0,01	0,02	0,03	0,24	8,72
Влагалище	0,21	0,09	2×10 ⁻⁴	0,02	0,02	0,08	7,02
Мочевой пузырь	0,26	0,08	0,004	0,02	0,02	0,14	8,66
Предстательная железа	0,20	0,10	0,003	0,02	0,03	0,10	6,91
Семенники	0,12	0,05	6×10 ⁻⁴	0,01	0,04	0,06	3,93
ЭД, мЗв	1,92	0,07	0,1	0,96	1,60	2,32	6,16

Таблица 4

Характеристика накопленной поглощённой дозы (мГр) пациентов, обследованных при помощи КТ, в распределении по органам и тканям (все исследования, за исключением области коленного сустава, n=208)

Distribution of cumulative absorbed organ dose of patients underwent CT, mGy (all protocols but knee, n=208)

Орган	Сред. зн.	Стд. откл.	Мин.	25 %	Медиана	75 %	Макс.
1	2	3	4	5	6	7	8
Красный костный мозг	2,56	0,10	0,22	1,69	1,95	3,06	7,95
Кости	5,55	0,21	0,62	3,73	5,15	6,10	18,40
Кожа	1,99	0,07	0,19	1,43	1,66	2,19	6,10
Головной мозг	14,76	1,16	3×10 ⁻⁴	0,05	8,88	24,73	82,42
Хрусталик	16,64	1,31	2×10 ⁻⁴	0,04	10,32	27,88	92,93
Глотка и гортань	1,46	1,16	0,002	0,60	0,86	1,23	20,47
Щитовидная железа	2,14	0,26	0,003	0,52	0,64	2,89	38,43
Трахея и бронхи	2,93	0,28	0,02	0,73	1,37	3,57	26,15
Пищевод	3,18	0,27	0,04	0,55	1,27	4,36	20,69
Лёгкие	3,50	0,28	0,04	0,72	1,75	4,75	22,14
Вилочковая железа	2,58	0,30	0,01	0,38	0,83	2,67	30,99

Распределение значений накопленной поглощённой дозы от КТ (мГр) в органах и тканях пациентов по квартильным интервалам (минимум, 25 %, 75 %, максимум) представлено на рис. 2.

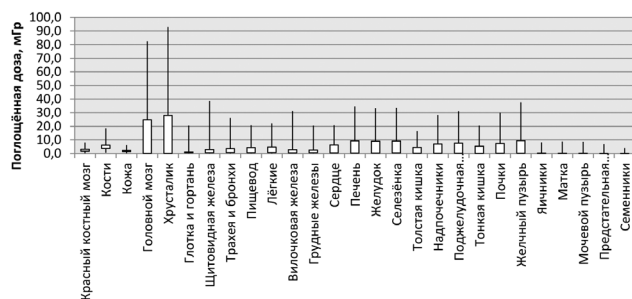


Рис. 2. Распределение значений накопленной поглощённой дозы за счёт КТ (мГр) в органах и тканях (все исследования, за исключением области коленного сустава, n=208)

Fig. 2. Distribution of absorbed CT dose by organs and tissues resulted from all CT examinations, except knee (n=208)

Наибольшей лучевой нагрузке при КТ-исследованиях пациентов изучаемой группы подвергался хрусталик глаза (средняя поглощённая доза 16,6 ± 1,3 мГр) и головной мозг (14,8 ± 1,2 мГр). Наибольшей величины доза облучения хрусталика и головного мозга достигала при исследованиях головы (27,7 и 24,6 мГр, соответственно). При этом, максимальная доза в хрусталике достигала значений свыше 90 мГр, а в головном мозге – свыше 80 мГр. В несколько меньшей дозе (среднее значение до 6 мГр), облучались органы брюшной полости – печень и желчный пузырь, желудок и селезёнка, а также костная поверхность (5,6 мГр).

При исследовании области грудной клетки наибольшему облучению подвергались трахея, бронхи, лёгкое и тимус (средняя величина накопленной дозы более 5 мГр). Среднее значение накопленной поглощённой дозы рентгеновского излучения при исследовании области грудной клетки (лёгкие, сердце, вилочковая железа, пищевод, трахея, бронхи, и молочные железы) составило $3,0 \pm 0,6$ мГр, а при исследовании органов брюшной полости (печень, желчный пузырь, селезёнка, желудок, поджелудочная железа, почки и надпочечники, тонкая и толстая кишка) $4,5 \pm 1,1$ мГр.

Для области малого таза (матка, яичники, влагалище, предстательная железа и семенники) среднее значение поглощённой дозы на орган составило $0,12 \pm 0,06$ мГр, при этом средняя доза облучения органов женской репродуктивной системы была выше дозы облучения органов мужской репродуктивной системы.

Доза производственного облучения

Таблица 5

Распределение суммарной поглощённой дозы (мГр) производственного внешнего гамма-излучения персонала ПО «Маяк», обследованного при помощи КТ (n=24)

Distribution of cumulative absorbed organ doses (mGy) due to occupational exposure to external gamma radiation of nuclear workers examined using CT (n=24)

Орган	Сред. зн.	Стд. откл.	Мин.	25 %	Ме-диана	75 %	Макс.
Головной мозг	163,1	46,4	0,9	39,0	96,1	113,3	1017,5
Кости	202,1	55,2	1,5	59,3	114,7	147,7	1243,4
Молочные железы	46,0	25,3	4,7	45,5	86,3	191,6	581,1
Пищевод	142,7	38,4	1,0	34,5	83,8	156,9	828,6
Почки	137,8	40,2	0,7	31,6	74,1	134,2	884,8
Печень	165,1	42,3	1,4	42,2	96,0	211,6	897,0
Желчный пузырь	166,5	41,3	1,6	42,9	100,9	235,1	849,9
Лёгкое	171,9	45,3	1,3	43,8	100,6	204,5	975,7
Желудок	174,3	44,1	1,6	45,5	105,7	237,6	929,9
Красный костный мозг	146,0	40,4	0,9	35,7	86,0	156,9	880,8
Кожа	187,9	52,3	1,2	47,5	109,6	197,9	1152,1
Ободочная кишка	149,8	37,9	1,3	37,4	87,6	194,2	792,7
Тонкая кишка	151,0	37,9	1,4	38,1	89,7	201,0	790,3
Толстая кишка	156,5	39,4	1,4	39,8	94,1	209,8	821,1
Щитовидная железа	195,6	48,6	1,9	50,5	121,4	270,8	1006,4
Матка	117,2	54,7	3,7	31,1	65,8	138,7	430,7
Семенники	206,5	61,7	1,8	42,5	116,2	303,8	997,5
Яичники	118,9	55,8	3,5	32,1	65,0	143,8	438,8

Распределение значений накопленной поглощённой дозы от внешнего производственного гамма-излучения (мГр) в органах и тканях по квартильным интервалам (минимум, 25 %, 75 %, максимум) представлено на рис. 3.

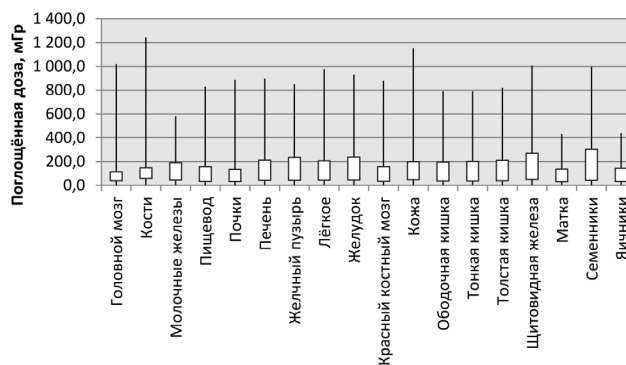


Рис. 3. Распределение значений накопленной поглощённой дозы внешнего гамма излучения (мГр) в органах и тканях персонала (n=24)
Fig. 3. Distribution of absorbed dose by organs and tissues resulted from occupational external gamma exposure (n=24)

Таблица 6

Распределение суммарной поглощённой дозы (мГр) производственного внутреннего альфа-облучения у персонала ПО «Маяк», обследованного при помощи КТ (n=16)

Distribution of cumulative absorbed organ doses (mGy) due to occupational exposure to internal alpha radiation of nuclear workers examined using CT (n=16)

Орган	Сред. зн.	Стд. откл.	Мин.	25 %	Ме-диана	75 %	Макс.
Лёгкое	24,1	10,6	0,04	2,0	8,2	22,4	147,5
Печень	19,4	9,4	0,05	1,1	3,4	20,5	147,6
Поверхность кости	78,1	37,9	0,2	4,3	12,8	80,9	590,4
Красный костный мозг	3,9	1,9	0,01	0,3	0,8	4,1	29,8
Гонады	0,8	0,4	0,002	0,01	0,2	0,8	6,9
Почки	0,4	0,2	0,001	0,02	0,07	0,4	3,1
Мочевой пузырь	0,1	0,06	3×10^{-4}	0,006	0,02	0,1	0,9
Желудок	0,1	0,06	3×10^{-4}	0,006	0,02	0,1	0,9
Тонкая кишка	0,1	0,06	3×10^{-4}	0,006	0,02	0,1	0,9
Нижний отдел ободочной кишки	0,1	0,06	4×10^{-4}	0,006	0,02	0,1	1,0
Мышцы	0,1	0,06	3×10^{-4}	0,007	0,02	0,1	0,9

Сравнение доз диагностического и производственного облучения

Сравнительная характеристика суммарной поглощённой дозы диагностического облучения и производственного внешнего гамма- и внутреннего альфа-облучения у работников ПО Маяк, имеющих ненулевые дозы производственного облучения, представлено в табл. 7.

Таблица 7

Сравнительная характеристика суммарной поглощённой дозы диагностического облучения при компьютерной томографии и производственного внешнего гамма- и внутреннего альфа-облучения у работников ПО Маяк, обследованных при помощи КТ (n=24)

Comparison of cumulative absorbed organ dose resulted from CT examinations and external gamma- and internal radiation resulted from occupational exposure (n=24)

Орган	Медиана OD КТ (мин-макс), мГр	Медиана OD γ (мин; макс), мГр	Медиана OD α (мин; макс), мГр
1	2	3	4
Костный мозг	2,35 (0,22; 7,95)	85,99 (0,89; 880,8)	0,82 (0,01; 29,8)
Кости	5,41 (0,62; 13,9)	114,73 (1,5; 1243,4)	12,8 (0,2; 590,4)
Кожа	1,82 (0,19; 5,84)	109,59 (1,2; 1152,1)	—

Окончание таблицы 7

Головной мозг	11,47 (4×10 ⁻³ ; 61,83)	96,06 (0,91; 1017,5)	–
1	2	3	4
Щитовидная железа	0,64 (0,11; 6,74)	121,43 (1,86; 1006,4)	–
Пищевод	1,37 (0,16; 12,67)	83,81 (0,97; 828,57)	–
Лёгкие	1,75 (0,29; 13,74)	100,56 (1,32; 975,74)	8,16 (0,04; 147,51)
Молочные железы	0,60 (0,31; 5,93)	86,33 (4,69; 581,08)	–
Желудок	0,75 (0,13; 32,38)	105,66 (1,64; 929,93)	0,02 (3×10 ⁻⁴ ; 0,89)
Печень	0,88 (0,15; 33,80)	96,03 (1,41; 896,98)	3,37 (0,05; 147,62)
Желчный пузырь	0,33 (0,12; 37,0)	100,91 (1,62; 849,95)	–
Тонкая кишка	0,29 (0,09; 19,96)	89,72 (1,35; 790,29)	0,02 (3×10 ⁻⁴ ; 0,89)
Толстая кишка	0,37 (0,05; 16,39)	94,12 (1,42; 821,06)	0,02 (4×10 ⁻⁴ ; 0,95)
Почки	0,36 (0,08; 28,98)	74,11 (0,72; 884,76)	0,07 (0,001; 3,07)
Матка	0,02 (0,005; 0,34)	65,83 (3,65; 430,74)	–
Яичники	0,02 (0,008; 0,42)	65,02 (3,51; 438,81)	–
Семенники	0,06 (8×10 ⁻⁴ ; 3,21)	116,24 (1,83; 997,49)	–

Величина накопленной дозы производственного облучения работника (за исключением дозы на гонады) за весь период производственной деятельности была в среднем в 136 (8,4; 309,4) раз выше дозы в результате проведения компьютерной томографии. Характеристика периода наблюдения, за который была накоплена доза диагностического и производственного облучения пациентов исследуемой группы, представлен в табл. 8.

Таблица 8

Сравнительная характеристика интервала времени, в течение которого была накоплена доза диагностического и производственного облучения

Period of dose accumulation of CT examinations and occupational exposure

Источник излучения	t, лет	Стд. откл.	Мин.	25 %	Медиана	75 %	Макс.
Рентгеновское КТ	6,5	0,15	0	6,0	7,0	8,0	9,0
Производственное γ	22,0	2,73	1,0	10,0	26,0	29,0	46,0
Производственное α	39,6	2,19	28,0	34,5	36,0	47,0	58,0

Данные, приведённые в табл. 8, свидетельствуют о различных интервалах времени накопления доз диагностического и производственного облучения работников ПО «Маяк». Для производственного внешнего излучения средняя длительность профессионального маршрута работников в наблюдаемой группе составляет 22 года, тогда как для диагностического облучения при КТ в исследуемой группе данный период составляет в среднем 6,5 лет, что объясняется сравнительно недавним появлением компьютерной томографии в медицинских учреждениях Челябинской области. При этом для 24 пациентов, являвшихся работниками ПО «Маяк», в 22 случаях в течение периода наблюдения проведено единственное КТ-исследование, и только в 2 случаях проводились повторные исследования, что характеризует преимущественно сценарий острого облучения.

Сравнение значений медианы суммарной поглощённой дозы, полученной в результате проведения компьютерной томографии, и дозы производственного внешнего гамма-излучения персонала ПО «Маяк», нормализованной к периоду 1 год, а также годовой КТ-эквивалент внешнего гамма-облучения персонала представлены в табл. 9:

Таблица 9

Сравнение медиан суммарной поглощённой дозы в результате проведения компьютерной томографии, и дозы производственного внешнего гамма-излучения персонала ПО «Маяк», нормализованной к 1 году, и КТ-эквивалент внешнего гамма облучения за год

Comparison of median cumulative absorbed organ dose received from CT and external gamma-radiation of occupationally exposed Mayak workers normalized per 1 year, and annual CT equivalent of external gamma exposure

Орган	КТ, мГр	Внешнее γ , мГр в год	КТ-эквивалент γ
Красный костный мозг	2,35	3,67	0,64
Кости	5,41	4,95	1,09
Кожа	1,82	4,75	0,38
Головной мозг	11,47	4,07	2,82
Щитовидная железа	0,64	4,44	0,14
Пищевод	1,37	3,55	0,39
Лёгкие	1,75	4,13	0,42
Молочные железы	0,6	3,86	0,16
Желудок	0,75	3,95	0,19
Печень	0,88	3,83	0,23
Желчный пузырь	0,33	3,77	0,09
Тонкая кишка	0,29	3,50	0,08
Толстая кишка	0,37	3,47	0,11
Почки	0,36	3,24	0,11
Матка	0,02	3,03	0,01
Яичники	0,02	2,92	0,01
Семенники	0,06	4,84	0,01

Обсуждение

Сравнение поглощённых доз на органы и ткани при воздействии рентгеновского диагностического излучения при компьютерной томографии, и производственного излучения возможно с учётом неопределённости в их оценке [21–23]. Основным источником неопределённости при реконструкции поглощённой дозы облучения при компьютерной томографии ретроспективным методом является ограниченная доступность данных антропометрии пациентов, вследствие чего, как показано в публикации [25], полученные оценки доз для сканеров Siemens могут отличаться от фактических значений на величину порядка 20 %. Дополнительным источником неопределённости при оценке дозы облучения пациента является использование косвенного метода дозиметрии с использованием антропоморфных фантомов, которые являются обобщённой моделью, основанной на реальных характеристиках обследуемых пациентов [18].

Значительный разброс значений поглощённой дозы от её средней величины обусловлен характером распределения, отличным от нормального, что при небольшом количестве наблюдений представляет определённые трудности для однопараметрического анализа. Допустимой альтернативой для сравнения двух различных дозовых распределений является использование медианы дозы и интерквартильных значений.

В случаях хронического радиационного воздействия, состоящего из многочисленных эпизодов облучения, характерных для производственной деятельности пер-

сонала предприятий ядерно-промышленного комплекса, ключевое значение имеет темп накопления дозы. Ввиду отсутствия данных о дозиметрии каждого эпизода производственного облучения в течение года в отдельности, минимальным периодом для сравнения дозы облучения выбран период 1 год. Ввиду продолжительного времени профессиональной деятельности работников (табл.8), накопленная за период трудового стажа доза производственного облучения могла достигать значительных величин (1 Гр и более).

В противоположность этому, сценарий острого однократного облучения в относительно небольших дозах при компьютерной томографии для исследуемой группы был зафиксирован в большинстве случаев 88,2 % [16], что свидетельствует о существенных различиях в мощности дозы производственного и диагностического облучения.

Полученные оценки поглощённой дозы при проведении КТ свидетельствуют о неравномерной лучевой нагрузке со значительным (до 30 мГр) уровнем облучения головного мозга и хрусталика глаза. Согласно действующим Нормам радиационной безопасности, «При хроническом облучении в течение жизни защитные мероприятия становятся обязательными, если годовые поглощенные дозы превышают значения, приведенные в таблице 6.2. Превышение этих доз приводит к серьезным детерминированным эффектам». Средняя величина поглощённой дозы в хрусталике глаза при различных протоколах КТ-исследований (табл.4) сопоставима с результатами других измерений [26] и находится ниже установленного уровня вмешательства, который составляет 0,1 Гр в год [27]. Поскольку полученное значение дозы находится в пределах установленных норм, среди пациентов исследуемой группы развитие детерминированных эффектов (в частности, лучевой катаракты) маловероятно.

При этом, согласно публикации 103 МКРЗ [19], полученное значение поглощённой дозы в хрусталике глаза превышает допустимый предел эквивалентной дозы, установленный на уровне 15 мЗв для населения. С учётом этого, необходимо осуществлять наблюдение за пациентами, прошедшими компьютерно-томографические исследования, в целях оценки возможной реализации стохастических эффектов, в частности, злокачественных новообразований [28]. С учётом того, что нервная система является одной из наиболее устойчивых тканей к воздействию ионизирующего излучения, реализация таких эффектов представляется достаточно редким событием, что требует увеличения базы исследования для достижения достаточной мощности статистических критериев их оценки.

Одним из способов решения данной проблемы является проведение масштабных когортных исследований отдалённых последствий воздействия ионизирующего излучения, как это было показано в работе [29], где было выявлено 285 избыточных случаев злокачественных новообразований центральной нервной системы среди 105 444 лиц с ненулевыми дозами облучения головного мозга от внешнего гамма-нейтронного излучения при периоде наблюдения более 60 лет. Значительным информационным ресурсом для проведения

такого исследования в России располагает база данных «Регистр КТ» [30], которая является результатом проведения уникального многоцентрового эпидемиологического исследования по оценке радиогенного риска при диагностическом облучении в результате проведения компьютерной томографии, для которого настоящее исследование предоставляет дополнительный кластер данных [31].

Заключение

В исследовании проведена сравнительная оценка поглощённых доз на органы и ткани от различных источников радиационного воздействия: как рентгеновского диагностического излучения при компьютерной томографии, так и производственного внешнего гамма- и внутреннего альфа-облучения персонала ПО «Маяк». Согласно полученным результатам, максимальное значение поглощённой дозы в органах и тканях в результате проведения КТ не превышало 100 мГр, а её средняя величина при всех типах исследований не превышала 50 мГр. При этом накопленная за весь период производственной деятельности поглощённая доза производственного внешнего гамма облучения была в среднем в 136 раз выше величины накопленной дозы, полученной работником в результате проведения одного КТ-исследования, тогда как годовые эквиваленты отличались в 6 раз.

Величины поглощённых доз в различных органах и тканях при КТ-исследованиях значительно варьируют в зависимости от исследуемой области, что говорит о необходимости выделения критических органов при типовых протоколах исследования, таких как головной мозг и хрусталик глаза при исследовании области головы, лёгкие, трахея и бронхи при исследовании грудной клетки, и желудок и органы гепатобилиарной системы при исследовании брюшной полости, в целях обеспечения радиационной защиты пациентов.

Полученные значения КТ-эквивалента годовой дозы для внешнего гамма-излучения у работников ПО «Маяк» свидетельствуют о необходимости учёта эпизодов радиационного воздействия при проведении рентгенодиагностических процедур методом компьютерной томографии у персонала ядерно-промышленного комплекса. В связи с отсутствием ограничений по дозе облучения для медицинских диагностических процедур, данная категория лиц нуждается в особом тщательном наблюдении, поскольку с увеличением совокупной дозы облучения от производственных и диагностических источников, вероятность реализации отдалённых канцерогенных эффектов у лиц данной группы возрастает.

Благодарности

Авторы выражают благодарность коллективу отделения компьютерной томографии ГБУЗ «Районная больница г. Касли» за помощь в проведении исследования. Особую благодарность авторы выражают старшему научному сотруднику ФГБУН ЮУрИБФ, заведующему лабораторией радиационной защиты, к.б.н. Вадиму Владимировичу Вострогину, за помощь в обсуждении результатов исследования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 102. Managing Patient Dose in Multi-Detector Computed Tomography (MDCT) // Ann. ICRP. 2007. V.37, No. 1. P. 1-79.
- Барковский А.Н., Братилова А.А., Кормановская Т.А., Ахматдинов Р.Р. Динамика доз облучения населения Российской Федерации за период с 2003 по 2018 г. // Радиационная гигиена. 2020. Т.12, № 4. С. 96-122.
- Дружинина П.С., Чипига Л.А., Рыжов С.А., Водоватов А.В., Беркович Г.В., Смирнов А.В., Ярына Д.В., Ермолина Е.П., Дружинина Ю.В. Современные подходы к обеспечению качества диагностики в компьютерной томографии // Радиационная гигиена. 2021. Т.14, № 1. С. 17-33. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-1-17-33>.
- Заполнение форм федерального государственного статистического наблюдения № 3-ДОЗ: Методические рекомендации по обеспечению радиационной безопасности. Утверждены Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 16.02.2007 г. № 0100/1659-07-26.
- Rühm W., Harrison R.M. High CT Doses Return to the Agenda // Radiation and Environmental Biophysics. 2020;59:3-7. DOI: 10.1007/s00411-019-00827-9.
- Chipiga L., Bernhardsson C. Patient Doses in Computed Tomography Examinations in Two Regions of the Russian Federation // Rad. Prot. Dosim. 2016. V.169, No. 1-4. P. 240-244.
- Brambilla M., Vassileva J., Kuchcinska A., Rehani M.M. Multinational Data on Cumulative Radiation Exposure of Patients from Recurrent Radiological Procedures: Call for Action // European Radiology. 2020. V.30, No. 5. P. 2493-2501. <https://doi.org/10.1007/s00330-019-06528-7>.
- National Research Council (US), Board on Radiation Effects Research. Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII, Phase I, Letter Report (1998). Washington: National Academies Press (US), 1998.
- National Research Council. Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII, Phase II. Washington: National Academies Press (US), 2006.
- Shao Yu-H., Tsai K., Kim S., Yu J., Demissie K. Exposure to Tomographic Scans and Cancer Risks // JNCI Cancer Spectrum. 2020. V.4, No. 1. P. pkz072. doi.org/10.1093/jncics/pkz072.
- Mattsson S. Need for Individual Cancer Risk Estimates in X-Ray and Nuclear Medicine Imaging // Radiation Protection Dosimetry. 2016. V.169, No. 1-4. P. 1-6. [doi:10.1093/rpd/ncw034](https://doi.org/10.1093/rpd/ncw034).
- Голиков В.Ю., Водоватов А.В., Чипига Л.А., Шацкий И.Г. Оценка радиационного риска у пациентов при проведении медицинских исследований в Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2021. Т.14, № 3. С. 56-68.
- Осипов М.В., Важенин А.В., Доможирова А.С., Чернова О.Н., Аксенова И.А. Компьютерная томография как фактор риска у онкологических пациентов при наличии профессионального облучения // Российский электронный журнал лучевой диагностики. 2019. Т.9, № 1. С. 142-147.
- Hunter N., Kuznetsova I.S., Labutina E.V., Harrison J.D. Solid Cancer Incidence other than Lung, Liver and Bone in Mayak Workers: 1948-2004 // Br. J. Cancer. 2013. V.109, No. 7. P. 1989-96. [doi: 10.1038/bjc.2013.543](https://doi.org/10.1038/bjc.2013.543).
- Fisher D.R., Fahey F.H. Appropriate Use of Effective Dose in Radiation Protection and Risk Assessment // Health Phys. 2017. V.113, No. 2. P. 102-109. [doi: 10.1097/HP.0000000000000674](https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000674).
- Осипов М.В., Шкаредных В.Ю., Логинов В.С., Мельников В.В., Дружинина П.С., Сокольников М.Э. Ретроспективный анализ онкологической заболеваемости пациентов после проведения компьютерной томографии // Радиационная гигиена. 2021. Т.14, № 3. С. 80-90. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-80-90.
- Lee C., Kim K.P., Bolch W.E., Moroz B.E., Folio L. NCICT: a Computational Solution to Estimate Organ Doses for Pediatric and Adult Patients Undergoing CT Scans // Journal of Radiological Protection. 2015. V.35, No. 4. P. 891-909. [doi:10.1088/0952-4746/35/4/891](https://doi.org/10.1088/0952-4746/35/4/891).
- Koshurnikova N.A., Shilnikova N.S., Okatenko P.V. Characteristics of the Cohort of Workers at the Mayak Nuclear Complex // Radiation Research. 1999. V.152, No. 4. P. 352-363.
- Vostrotin V., Birchall A., Zhdanov A., Puncher M., Efimov A., Napier B., et al. The Mayak Worker Dosimetry System (MWDS-2013): Internal Dosimetry Results // Radiation Protection Dosimetry. 2017. V.176, No. 1-2. P. 190-201. [doi:10.1093/rpd/ncw268](https://doi.org/10.1093/rpd/ncw268).
- Vasilenko E.K., Khokhryakov V.F., Miller S.C., Fix J.J., Eckerman K., Choe D.O., et al. Mayak Worker Dosimetry Study: an Overview // Health Phys. 2007. No. 93. P. 190-206.
- Stata, Stata Statistical Software: Release 7.0, Stata Corporation. College Station, 2001.
- Birchall A., Puncher M., Harrison J., Riddell A., Bailey M.R., Khokhryakov V., Romanov S. Plutonium Worker Dosimetry // Radiat. Environ. Biophys. 2010. V.49, No. 2. P. 203-212.
- Sahbaee P.W., Segars P., Samei E. Patient-Based Estimation of Organ Dose for a Population of 58 Adult Patients Across 13 Protocol Categories // Medical Physics. 2014. V.41, No. 7. P. 072104. <https://doi.org/10.1118/1.4883778>.
- Lee C., Lodwick D., Hurtado J., Pafundi D., Williams J.L., Bolch W.E. The UF Family of Reference Hybrid Phantoms for Computational Radiation Dosimetry // Physics in Medicine and Biology. 2010. V.55, No. 2. P. 339-363.
- Hardy A.J., Bostani M., Kim G.H.J., Cagnon C.H., Zankl M.A., McNitt-Gray M. Evaluating Size-Specific Dose Estimate (SSDE) as an Estimate of Organ Doses from Routine CT Exams Derived from Monte Carlo Simulations // Med. Phys. 2021. V.48, No. 10. P. 6160-6173. [doi: 10.1002/mp.15128](https://doi.org/10.1002/mp.15128).
- СанПин 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ/99/2009). М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009.
- Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 // Annals of the ICRP. 2007. V.37, No. 2-4. 332 p.
- Nikupaavo U., Kaasalainen T., Reijonen V., Ahonen S.M., Kortseniemi M. Lens Dose in Routine Head CT: Comparison of Different Optimization Methods with Anthropomorphic Phantoms // Am. J. Roentgenol. 2015. V.204, No. 1. P. 117-123. [doi: 10.2214/AJR.14.12763](https://doi.org/10.2214/AJR.14.12763).
- Poon R., Badawy M.K. Radiation Dose and Risk to the Lens of the Eye During CT Examinations of the Brain // Med. Imaging. Radiat. Oncol. 2019. V.63, No. 6. P. 786-794. [doi: 10.1111/1754-9485.12950](https://doi.org/10.1111/1754-9485.12950).
- Brenner A.V., Sugiyama H., Preston D.L., Sakata R., French B., Sadakane A., Cahoon E.K., Utada M., Mabuchi K., Ozasa K. Radiation Risk of Central Nervous System Tumors in the Life Span Study of Atomic Bomb Survivors, 1958-2009 // Eur. J. Epidemiol. 2020. V.35, No. 6. P. 591-600. [doi: 10.1007/s10654-019-00599-y](https://doi.org/10.1007/s10654-019-00599-y).
- Осипов М.В., Сокольников М.Э., Фомин Е.П. База данных компьютерной томографии населения г. Озёрск («Регистр КТ»): А. с. № 2020622687. Федеральное государственное унитарное предприятие Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства (ФГУП ЮУРИБФ) (RU). Опубл. 24.12.2020. URL: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=DB&DocNumber=2020622807&TypeFile=html (Дата обращения 22.02.2022).
- Осипов М.В., Фомин Е.П., Сокольников М.Э. Оценка влияния диагностического облучения с использованием радиационно-эпидемиологического регистра населения г. Озёрска, обследованного при помощи компьютерной томографии // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020. Т.65, № 4. С. 65-73. DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-4-65-73.
- Brooks A.L. The Impact of Dose Rate on the Linear no Threshold Hypothesis // Chem. Biol. Interact. 2019. No. 301. P. 68-80. [doi: 10.1016/j.cbi.2018.12.007](https://doi.org/10.1016/j.cbi.2018.12.007).

REFERENCES

- Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 102. Managing Patient Dose in Multi-Detector Computed Tomography (MDCT). Ann. ICRP. 2007;37;1:1-79.
- Barkovskiy A.N., Bratilova A.A., Kormanovskaya T.A., Akhmatdinov R.R. Trends in the Doses of the Population of the Russian Federation in 2003–2018. *Radiatsionnaya Gigiyena = Radiation Hygiene*. 2020;12;4:96-122 (In Russ.).
- Druzhinina P.S., Chipiga L.A., Ryzhov S.A., Vodovатов A.V., Berkovich G.V., Smirnov A.V., Yaryna D.V., Yermolina Ye.P., Druzhinina Yu.V. Proposals for the Russian Quality Assurance Program in Computed Tomography. *Radiatsionnaya Gigiyena = Ra-*

- diation Hygiene. 2021;14;1:17-33. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-1-17-33> (In Russ.).
4. *Zapolneniye Form Federalnogo Gosudarstvennogo Statisticheskogo Nablyudeniya № 3-DOZ = Filling in the Forms of the Federal State Statistical Observation No. 3-DOZ: Methodological Recommendations for Ensuring Radiation Safety. Approved by the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare on February 16, 2007 No. 0100/1659-07-26* (In Russ.).
 5. Rühm W., Harrison R.M. High CT Doses Return to the Agenda. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2020;59:3-7. DOI: 10.1007/s00411-019-00827-9.
 6. Chipiga L., Bernhardtsson C. Patient Doses in Computed Tomography Examinations in Two Regions of the Russian Federation. *Rad. Prot. Dosim.* 2016;169;1-4:240-244.
 7. Brambilla M., Vassileva J., Kuchcinska A., Rehani M.M. Multi-national Data on Cumulative Radiation Exposure of Patients from Recurrent Radiological Procedures: Call for Action. *European Radiology*. 2020;30;5:2493-2501. <https://doi.org/10.1007/s00330-019-06528-7>.
 8. National Research Council (US), Board on Radiation Effects Research. *Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII, Phase I, Letter Report (1998)*. Washington, National Academies Press (US), 1998.
 9. National Research Council. *Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII, Phase II*. Washington, National Academies Press (US), 2006.
 10. Shao Yu-H., Tsai K., Kim S., Yu J., Demissie K. Exposure to Tomographic Scans and Cancer Risks. *JNCI Cancer Spectrum*. 2020;4;1:pkz072. doi.org/10.1093/jncics/pkz072.
 11. Mattsson S. Need for Individual Cancer Risk Estimates in X-Ray and Nuclear Medicine Imaging. *Radiation Protection Dosimetry*. 2016;169;1-4:1-6. [doi:10.1093/rpd/ncw034](https://doi.org/10.1093/rpd/ncw034).
 12. Golikov V.Yu., Vodovatov A.V., Chipiga L.A., Shatskiy I.G. Assessment of Radiation Risk in Patients During Medical Examinations in the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gigiyena = Radiation Hygiene*. 2021;14;3:56-68 (In Russ.).
 13. Osipov M.V., Vazhenin A.V., Domozhirova A.S., Chernova O.N., Aksenova I.A. Computed Tomography as a Risk Factor in Cancer Patients With Professional Radiation Exposure. *Rossiyskiy Elektronnyy Zhurnal Luchevoy Diagnostiki = Russian Electronic Journal of Radiology*. 2019;9;1:142-147 (In Russ.).
 14. Hunter N., Kuznetsova I.S., Labutina E.V., Harrison J.D. Solid Cancer Incidence other than Lung, Liver and Bone in Mayak Workers: 1948-2004. *Br. J. Cancer*. 2013;109;7:1989-96. [doi: 10.1038/bjc.2013.543](https://doi.org/10.1038/bjc.2013.543).
 15. Fisher D.R., Fahey F.H. Appropriate Use of Effective Dose in Radiation Protection and Risk Assessment. *Health Phys*. 2017;113;2:102-109. [doi: 10.1097/HP.0000000000000674](https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000674).
 16. Osipov M.V., Shkarednykh V.Yu., Loginov V.S., Melnikov V.V., Druzhinina P.S., Sokolnikov M.E. Retrospective Analysis of Cancer Morbidity among Patients after Computed Tomography. *Radiatsionnaya Gigiyena = Radiation Hygiene*. 2021;14;3:80-90. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-80-90 (In Russ.).
 17. Lee C., Kim K.P., Bolch W.E., Moroz B.E., Folio L. NCICT: a Computational Solution to Estimate Organ Doses for Pediatric and Adult Patients Undergoing CT Scans. *Journal of Radiological Protection*. 2015;35;4:891-909. [doi:10.1088/0952-4746/35/4/891](https://doi.org/10.1088/0952-4746/35/4/891).
 18. Koshurnikova N.A., Shilnikova N.S., Okatenko P.V. Characteristics of the Cohort of Workers at the Mayak Nuclear Complex. *Radiation Research*. 1999;152;4:352-363.
 19. Vostrotnin V., Birchall A., Zhdanov A., Puncher M., Efimov A., Napier B., et al. The Mayak Worker Dosimetry System (MWDS-2013): Internal Dosimetry Results. *Radiation Protection Dosimetry*. 2017;176;1-2:190-201. [doi:10.1093/rpd/ncw268](https://doi.org/10.1093/rpd/ncw268).
 20. Vasilenko E.K., Khokhryakov V.F., Miller S.C., Fix J.J., Eckerman K., Choe D.O., et al. Mayak Worker Dosimetry Study: an Overview. *Health Phys*. 2007;93:190-206.
 21. Stata. *Stata Statistical Software: Release 7.0*, Stata Corporation. College Station, 2001.
 22. Birchall A., Puncher M., Harrison J., Riddell A., Bailey M.R., Khokhryakov V., Romanov S. Plutonium Worker Dosimetry. *Radiat. Environ. Biophys*. 2010;49;2:203-212.
 23. Sahbaee P.W., Segars P., Samei E. Patient-Based Estimation of Organ Dose for a Population of 58 Adult Patients Across 13 Protocol Categories. *Medical Physics*. 2014;41;7:072104. <https://doi.org/10.1118/1.4883778>.
 24. Lee C., Lodwick D., Hurtado J., Pafundi D., Williams J.L., Bolch W.E. The UF Family of Reference Hybrid Phantoms for Computational Radiation Dosimetry. *Physics in Medicine and Biology*. 2010;55;2:339-363.
 25. Hardy A.J., Bostani M., Kim G.H.J., Cagnon C.H., Zankl M.A., McNitt-Gray M. Evaluating Size-Specific Dose Estimate (SSDE) as an Estimate of Organ Doses from Routine CT Exams Derived from Monte Carlo Simulations. *Med. Phys*. 2021;48;10:6160-6173. [doi: 10.1002/mp.15128](https://doi.org/10.1002/mp.15128).
 26. SanPin 2.6.1.2523-09. *Radiation Safety Standards (NRB(99/2009))*. Moscow Publ., 2009 (In Russ.).
 27. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007;37;2-4:332 p.
 28. Nikupaavo U., Kaasalainen T., Reijonen V., Ahonen S.M., Kortesiemi M. Lens Dose in Routine Head CT: Comparison of Different Optimization Methods with Anthropomorphic Phantoms. *Am. J. Roentgenol*. 2015;204;1:117-123. [doi: 10.2214/AJR.14.12763](https://doi.org/10.2214/AJR.14.12763).
 29. Poon R., Badawy M.K. Radiation Dose and Risk to the Lens of the Eye During CT Examinations of the Brain. *Med. Imaging. Radiat. Oncol*. 2019;63;6:786-794. [doi: 10.1111/1754-9485.12950](https://doi.org/10.1111/1754-9485.12950).
 30. Brenner A.V., Sugiyama H., Preston D.L., Sakata R., French B., Sadakane A., Cahoon E.K., Utada M., Mabuchi K., Ozasa K. Radiation Risk of Central Nervous System Tumors in the Life Span Study of Atomic Bomb Survivors, 1958-2009. *Eur. J. Epidemiol*. 2020;35;6:591-600. [doi: 10.1007/s10654-019-00599-y](https://doi.org/10.1007/s10654-019-00599-y).
 31. Osipov M.V., Sokolnikov M.E., Fomin Ye.P. *Baza Danykh Kompyuternoy Tomografii Naseleniya g. Ozersk («Registr KT») = Database of Computed Tomography of the Ozersk Population ("CT Register")*. Registration Certificate No. 2020622807. 2020. URL: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=DB&DocNumber=2020622807&TypeFile=html (Accessed 22.02.2022) (In Russ.).
 32. Osipov M.V., Fomin Ye.P., Sokolnikov M.E. Evaluation of Effects of Diagnostic Exposure Using Data from Epidemiological Registry of Ozyorsk Population Exposed to Computed Tomography. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2020;65;4:65-73. DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-4-65-73 (In Russ.).
 33. Brooks A.L. The Impact of Dose Rate on the Linear no Threshold Hypothesis. *Chem. Biol. Interact*. 2019;301:68-80. [doi: 10.1016/j.cbi.2018.12.007](https://doi.org/10.1016/j.cbi.2018.12.007).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 20.09.2022. **Принята к публикации:** 25.11.2022.

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

Financing. The study had no sponsorship.

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Article received: 20.09.2022. **Accepted for publication:** 25.11.2022.