

Influence of the irradiation geometry on the severity of acute radiation damage

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

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

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

The aim of this study was to demonstrate how the severity of radiation damage in the case of bone marrow syndrome due to acute irradiation depends on the non-uniform irradiation of the body. We used the calculation method that involves the evaluation of organism mortality as a function of bone marrow cells colony survival vs dose for different radiation profiles. It was presumed that the probability of the death for the organism is the same for the same value of survival level of the bone marrow cells regardless of the dose distribution by mass of the organ. The dose of uniform irradiation that is equivalent to the dose for the L-th case of non-uniform irradiation is calculate based on the survival level of the total marrow cells. After that the probability of the death of the organism is estimated according to the dose response curve. Dose distribution in bone marrow of computational MIRD-5-type stylized model adult man for different geometries of exposure by point source of ¹³⁷Cs was evaluated. Larger non-uniformity of the dose distribution in the bone marrow at the same dose in free air in the site of human location causes a greater probability of survival due to a greater proportion of bone marrow cells that have preserved the possibility of reproduction. The values of mean 50% lethal dose for cases of approximately uniform irradiation of the body surface (point source at a distance 10m) and sharply non-uniform irradiation (point source at a distance of 0.5 m) differ approximately by the factor of 1.7 – 2.5 depending on direction of irradiation. Additionally the values of conversion coefficients from the reading of an individual dosimeter to the value of an effective dose for various geometries of irradiation of emergency workers from the ¹³⁷Cs point source were calculated. The average value of the conversion coefficient from personal dose to effective dose for the considered exposure situations is 0.7 Sv Gy⁻¹ and the 90% confidence interval is 0.49 – 0.99 Sv Gy⁻¹.

Key words: acute irradiation, radiation damage, bone marrow syndrome, lethal dose.

Влияние геометрии облучения на тяжесть острого радиационного поражения

В.Ю. Голиков, А.В. Водоватов^{1,2}

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

Статья посвящена демонстрации того, как тяжесть радиационного поражения при остром облучении в случае костномозгового синдрома зависит от неоднородности облучения организма. В статье использовали метод расчета, при котором смертность организма оценивалась на основе функции выживания клеток костного мозга в зависимости от распределения в нем поглощенной дозы. Предполагалось, что вероятность смерти для организма одинакова для одного и того же значения уровня выживания клеток костного мозга независимо от распределения дозы по массе органа. Доза однородного облучения, эквивалентная дозе L-го случая неравномерного облучения, рассчитывалась на основе доли выживших клеток красного костного мозга. После этого вероятность смерти организма в случае костномозгового синдрома оценивалась с использованием зависимости смерт-

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

Голиков Владислав Юрьевич

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

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

ности от поглощенной дозы в клетках красного костного мозга при их равномерном облучении. Рассчитывалось распределение поглощенной дозы в красном костном мозге для математической модели MIRD-5 тела взрослого человека для разных геометрий облучения от точечного источника ^{137}Cs . Большая неравномерность распределения дозы в костном мозге при одинаковой дозе в свободном воздухе в месте расположения фантома обуславливала большую вероятность выживания из-за большей доли клеток костного мозга, которые сохранили способность к воспроизведению. Значения средней 50% летальной дозы для случаев приблизительно равномерного облучения поверхности фантома MIRD-5 (точечный источник на расстоянии 10 м) и резко неоднородного облучения (точечный источник на расстоянии 0,5 м) различались в 1,7–2,5 раза в зависимости от направления падения излучения. Кроме того, были рассчитаны значения коэффициентов перехода от показаний индивидуального дозиметра к эффективной дозе для различных геометрий облучения аварийных работников гамма-излучением точечного источника ^{137}Cs . Среднее значение коэффициента перехода от дозы, зарегистрированной индивидуальным дозиметром, к эффективной дозе для рассматриваемых ситуаций облучения составило $0,70 \text{ Sv Gy}^{-1}$ при 90% доверительном интервале $0,49–0,99 \text{ Sv Gy}^{-1}$.

Ключевые слова: острое облучение, радиационное поражение, костномозговой синдром, летальная доза.

Introduction

Arising acute tissue reactions (also referred to as 'deterministic effects') at whole body high-dose irradiation to penetrating radiation for radiation protection purposes are defined as possessing tissue-dependent dose thresholds with a minimum of the order of $\sim 1 \text{ Gy}$ [1, 2].

We use the following definition of acute radiation syndrome (ARS): "The acute radiation syndrome is a broad term used to describe a range of signs and symptoms that reflect severe damage to specific organ systems and that can lead to death within hours or up to several months after exposure" [3]. Three specific clusters of symptoms, associated with damage to three separate biologic compartments, point to the onset of ARS. These are known as the hematopoietic or bone marrow syndrome, the gastrointestinal syndrome, and the central nervous system or cardiovascular syndrome. In this respective order, they all occur with increasing whole-body dose. The hematopoietic and gastrointestinal syndromes may be accompanied by cutaneous radiation injury. Damage to the skin can also occur in the absence of ARS, in the case of high exposure by non-penetrating beta particles and low-energy photons, or in the case of extremely non-uniform (contact) exposure [4, 5].

Rapid emergency radiation dose assessment is necessary to identify individuals for early medical intervention. Currently medical intervention depends on the patient's medical signs and symptoms resulting from the radiation dose received. Immediate treatment is needed for otherwise healthy persons who have had whole or near-total body radiation exposure exceeding 2 Gy . $3\text{--}5 \text{ Gy}$ exposure without treatment would result in at least 50% mortality within 3 to 6 weeks [3, 6].

Current state-of-the-art practice for determining acute radiation doses relies on three methods using the following medical indicators [2, 6]:

1. Time-to-onset and severity of nausea and vomiting.
2. Lymphocyte depletion kinetics.
3. Chromosome aberration cytogenetics.

But, these methods not satisfactory for managing the medical casualties from radiological events and is need to develop new capabilities to assess radiation dose quickly with at least moderate precision [2].

IAEA has provided the following Generic Reference Levels for medical actions during radiation emergency at external exposure [7]:

Введение

При облучении всего тела проникающим излучением в больших дозах возникающие острые тканевые реакции (также называемые детерминированными эффектами) для целей радиационной защиты определяются как имеющие порог дозы, зависящий от типа ткани (органа), с минимальным значением $\sim 1 \text{ Гр}$ [1, 2].

Используем следующее определение острого радиационного (лучевого) синдрома (ОРС): «Острый радиационный синдром используется для описания широкого набора признаков и симптомов, которые отражают серьезные повреждения определенных систем органов и могут привести к смерти в течение времени от нескольких часов до нескольких месяцев после воздействия излучения [3]».

Различают три специфических типа ОРС, связанные с повреждением трех отдельных систем организма. Они известны как костномозговой синдром (кровотворная форма ОРС), кишечный синдром и поражение центральной нервной системы. В таком порядке они возникают с увеличением дозы облучения тела человека. Кровотворная и кишечная формы ОРС могут сопровождаться радиационным поражением кожи. Радиационное поражение кожи также может возникать при отсутствии ОРС в случае воздействия больших доз слабопроникающего бета-излучения или низкоэнергетических фотонов или в случае чрезвычайно неоднородного распределения поглощенной дозы по телу человека (контактное облучение) [4, 5].

Быстрая оценка дозы в случае возникновения аварийной ситуации необходима, в частности, для идентификации лиц, подлежащих раннему медицинскому вмешательству. В настоящее время медицинское вмешательство происходит в зависимости от наличия медицинских симптомов, известных и характерных для той или иной дозы облучения человека. Немедленное медицинское вмешательство необходимо для людей, которые могли иметь общее облучение организма в дозе, превышающей 2 Гр . Общее облучение в дозе $3\text{--}5 \text{ Гр}$ без лечения приведет к не менее 50% смертности в течение $3\text{--}6$ недель [3, 6].

Современная медицинская практика для оценки доз при остром радиационном поражении опирается на использование следующих медицинских показателей [2, 6]:

1. $AD_{torso} > 1 \text{ Gy-Eq}$ (is used to address external exposure to the red marrow, lung, small intestine, gonads, lens of eye, and thyroid from irradiation in uniform field of strongly penetrating radiation).

2. $AD_{tissue} > 25 \text{ Gy-Eq}$ (dose delivered to depth of 0.5 cm in tissue from contact (e.g. source carried in hand or pocket)).

3. $AD_{skin} > 10 \text{ Gy-Eq}$ to 600 cm^2 .

The existing guidelines for determining radiation doses usually state how to estimate the dose for a uniform irradiation of the body. Emergency irradiation of the body is frequently non-uniform. To select the proper method of treatment of injured it is necessary to evaluate dose distribution across the body or individual organs and tissues (for example, in red bone marrow).

According to UNSCEAR data [1] majority of radiation accidents with early acute clinical effects are linked to accidents involving sealed sources used in industrial facilities and in medical applications. 146 radiation accidents related to these practices with 1050 early acute clinical effects were reported in 1945-2007 period; 97 people deceased due to the high-dose irradiation. As a rule, these sources contained such radionuclides as ^{192}Ir , ^{137}Cs , ^{60}Co . The first rule in effective management is to be prepared. Preparation requires becoming knowledgeable about various emergency scenarios and thinking through appropriate responses to them before they occur.

The main aim of this study was to demonstrate how the severity of radiation damage due to acute irradiation in the case of bone marrow syndrome depends on the non-uniformity irradiation of the body with sealed sources of gamma radiation.

When performing the work to liquidate the consequences of accidents with sealed sources of gamma radiation doses of emergency workers should be estimated in terms of an effective dose on the basis of the readings of individual dosimeters. We did not find the data in the literature about the ratio of the readings of the individual dosimeters and the effective dose for such cases of human irradiation.

Therefore, the accompanying aim of this study was to calculate the values of conversion coefficients from the readings of the individual dosimeters of emergency workers to the value of effective dose.

Materials and methods

In case of damage of the hematopoietic system it is assumed that the death of the organism with a given probability occurs if the total activity of the system of cellular formation of the critical organ after irradiation is less than a certain threshold.

T.D. Jones stated [8] that the procedure for evaluating the organism mortality in the case of hematopoietic form of ARS includes the search for the expression of organism mortality as a function of survival of the red bone marrow (RBM) cells at uniform irradiation and estimation of survival level RBM cells vs dose for different radiation profiles in the cases of non-uniform distribution of radiation. Fig. 1 shows dose dependencies of the survival fraction of a population of RBM cells at uniform irradiation by photons with energy 660 keV obtained based on T.D. Jones data [8].

In order to integrate the data of Fig. 1 over the widely distributed hematopoietic proliferative system in human the dose distribution of RBM mass (marrow dose profiles) for different

1. Время начала после облучения и тяжесть проявления тошноты и рвоты.

2. Кинетика истощения лимфоцитов в крови.

3. Цитогенетические исследования хромосомных aberrаций.

Однако в [2] указывается, что в дополнение к этим медико-биологическим возможностям необходимо разработать новые методы для быстрой физической (расчетной) оценки дозы облучения пострадавших, хотя бы с умеренной погрешностью.

МАГАТЭ определяет следующие общие дозовые уровни для медицинского вмешательства при остром воздействии внешнего излучения [7]:

1. AD_{torso} (доза облучения всего тела) $> 1 \text{ Гр}$ (используется при характеристике облучения отдельных органов – красного костного мозга (ККМ), легких, тонкого кишечника, гонад, хрусталиков глаз, щитовидной железы в однородном поле сильно проникающего излучения).

2. AD_{tissue} (доза локального облучения мягких тканей на глубине 0,5 см и площади более 100 см^2) $> 25 \text{ Гр}$ (например, от источника переносимого в руке или кармане).

3. AD_{skin} (доза контактного облучения кожи площадью до 600 см^2) $> 10 \text{ Гр}$.

Существующие руководящие документы для определения доз излучения обычно посвящены оценке дозы равномерного облучения организма. Аварийное облучение тела человека часто не является равномерным. Поэтому в этом случае, чтобы выбрать правильный способ лечения, необходимо оценить распределение дозы по телу пострадавших или по отдельным органам и тканям (например, в ККМ).

Согласно данным НКДАР ООН [1], большинство радиационных аварий с ОРС связаны с несчастными случаями с закрытыми источниками гамма-излучения, используемыми на промышленных объектах, а также в медицине. В 146 радиационных авариях, связанных с этой деятельностью, в 1945–2007 гг. были отмечены 1050 ранних острых клинических эффектов; 97 человек погибли из-за облучения в больших дозах. Как правило, эти источники содержали такие радионуклиды, как ^{192}Ir , ^{137}Cs , ^{60}Co . Первое правило в эффективном управлении кризисными ситуациями – это предварительная подготовка данных о возможных сценариях их развития и заблаговременный поиск соответствующих решений и способов реагирования.

Основная цель этого исследования состояла в том, чтобы продемонстрировать, как тяжесть радиационного поражения на примере острого облучения человека гамма-излучением от закрытых источников в случае костномозгового синдрома (кроветворной формы лучевой болезни) зависит от неравномерности облучения его тела.

При выполнении работы по ликвидации последствий аварийных ситуаций с закрытыми источниками гамма-излучения дозы аварийных работников следует оценивать в терминах эффективной дозы на основе показаний индивидуальных дозиметров. Мы не обнаружили в литературе данных о соотношении между показаниями индивидуальных дозиметров и значениями эффективной дозы для таких ситуаций облучения человека.

Поэтому возникла дополнительная цель исследования, состоящая в том, чтобы рассчитать значения коэффициентов перехода от показаний индивидуальных дози-

irradiation scenarios must be calculated. That was performed using a dedicated calculation software [9, 10], that allows calculating the values of mean absorbed organ doses in 20 organs and tissues in computational MIR5 type stylized adult and pediatric models [11, 12], effective dose and ratios of effective dose to individual dosimeters readings for 48 points on the surface of the phantom.

The bone marrow dose profiles were calculated for the cases of point ^{137}Cs source located in front, behind and side of the phantom on different distances from vertical axis of phantom on the height of 1 m above the floor and for the case when it was in contact with phantom (trouser pocket).

The fraction of RBM which preserved reproduction after irradiation is determined by the Equation 1:

$$S^{(L)} = \sum_i m_i^{(L)}(D) \cdot s(D_i^{(L)}) = \bar{s}^{(L)} \quad (1)$$

where $S^{(L)}$ is survival level of the total marrow cells; $m_i^{(L)}(D)$ is the dose distribution of RBM mass at L -th case of non-uniform exposure; $s(D_i^{(L)})$ is dose dependence of viability of RBM cells (Fig. 1); $\bar{s}^{(L)}$ is a mean value of function S at L -th case of non-uniform exposure.

It is further postulated that the probability of death for the organism is the same for the same values of $S^{(L)}$ regardless of the dose distribution by mass of RBM. Dose D of uniform irradiation equivalent to the L -th case of non-uniform irradiation is calculated based on the value of $S^{(L)}$ (Equation 1) and dose dependence of viability of RBM cells (Fig. 1). The final step is to calculate the probability of death of the organism according to the dose response function for hematologic mortality [8] (see Fig. 2):

$$\text{Mortality}(\%) = \text{EXP}(3.84 + 5.35 \cdot \text{LN}(D / LD_{50})), LD_{50} = 2.5 \text{ Gy} \quad (2)$$

метров аварийных работников к значениям эффективной дозы.

Материалы и методы

В случае поражения кроветворной системы предполагается, что смерть организма с некоторой вероятностью наступает, если общая активность системы клеточного обновления критического органа, в данном случае красного костного мозга (ККМ), после облучения меньше, чем определенный порог.

T.D. Jones предположил [8], что процедура оценки смертности организма от кроветворной формы острой лучевой болезни включает в себя поиск выражения смертности организма как функции выживаемости клеток ККМ и оценки соответствующей дозы равномерного облучения клеток по их уровню выживания для различных профилей неравномерного распределения излучения. На рисунке 1 показана дозовая зависимость выживания клеток ККМ при равномерном облучении фотонами с энергией 660 кэВ, полученная на основе данных T.D. Jones [8].

Чтобы использовать данные рисунка 1 при равномерном облучении для случаев резко неравномерного облучения, были рассчитаны распределения поглощенной дозы по массе клеток ККМ (профили дозы) для различных сценариев облучения. Для этого использовали специализированное программное обеспечение [9, 10], позволяющее рассчитывать значения средних поглощенных доз в 20 органах и тканях в расчетной модели тела человека MIR5-5 различного возраста [11, 12], эффективную дозу, распределение дозы по массе ККМ и соотношения между эффективной дозой и показаниями 48 индивидуальных дозиметров, расположенных на поверхности фантома.

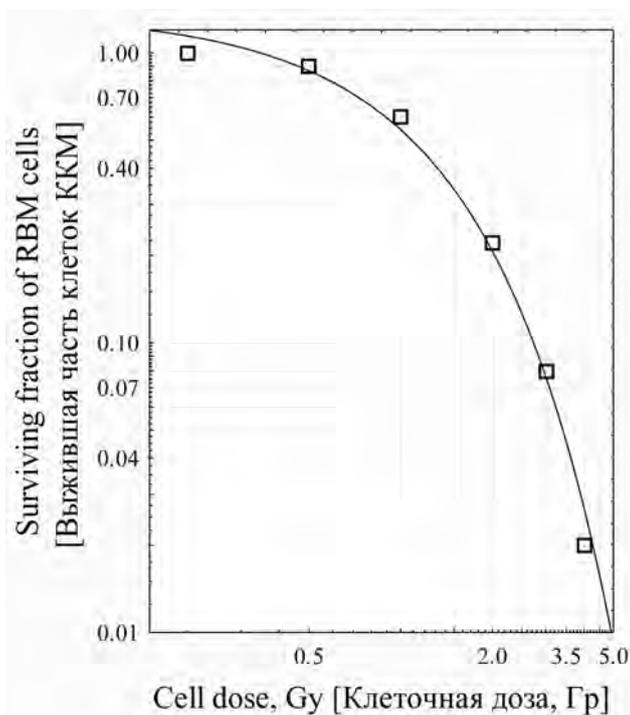


Fig. 1. Dose dependencies of viability of red bone marrow cells at uniform irradiation by 660 keV photons [8]

[Рис. 1. Дозовая зависимость выживаемости клеток красного костного мозга при однородном облучении фотонами с энергией 660 кэВ]

The same computational software [9] was used for the calculation of conversion coefficient values from the readings of the individual dosimeter located in the “typical” position on the body surface (see Fig.3) to the value of effective dose. Geometry of irradiation of emergency workers corresponded to different positions of point ^{137}Cs source in a front half-space relative to the worker.

Results and discussion

The results of marrow dose profiles calculation in the cases of point ^{137}Cs source located in front, behind and side of the phantom on different distances of 0.5m, 1m and 10m from vertical axis of phantom and in the case when it is in the contact with phantom (trouser pocket) are shown in Fig. 4. Then data in Fig.4 were used according to the Equation 1 for evaluation of the survival level of the total marrow for each irradiation situation. After that using Equation 2 the probabilities of mortality in the case of bone marrow syndrome were estimated. Obtained results of our calculations are shown in Table 1.

Профили дозы были рассчитаны для случаев точечного источника ^{137}Cs , располагавшегося спереди, сзади и сбоку от фантома на разных расстояниях от его вертикальной оси на высоте 1 м над полом, и для случая, когда источник находился в контакте с фантомом (в брючном кармане).

Фракция клеток ККМ, сохранившая способность к воспроизведению после облучения, определялась с помощью уравнения 1:

$$S^{(L)} = \sum_i m_i^{(L)}(D) \cdot s(D_i^{(L)}) = \bar{s}^{(L)} \quad (1)$$

где: $S^{(L)}$ – фракция клеток ККМ, которая сохранила способность к воспроизведению после облучения; $m_i^{(L)}(D)$ – распределение поглощенной дозы по массе ККМ для L -го случая неравномерного воздействия; $s(D_i^{(L)})$ – дозовая зависимость способности клеток ККМ к воспроизведению при равномерном облучении (см. рис. 1); $\bar{s}^{(L)}$ – среднее значение функции S для L -го случая неравномерного облучения.

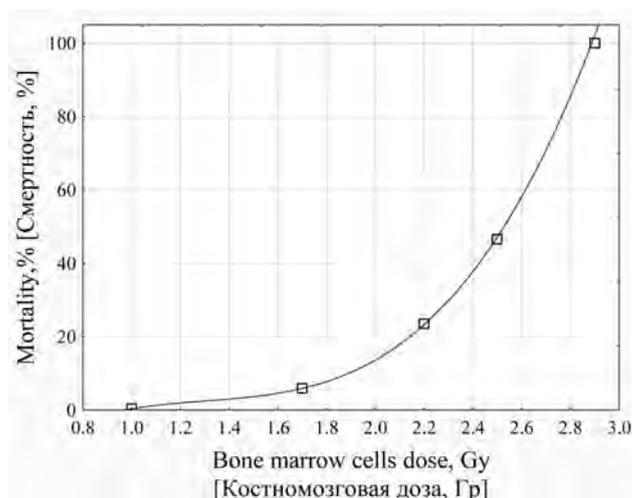


Fig. 2. Response function for prediction of mortality due to the hematologic syndrome [8]
[Рис. 2. Функция прогноза смертности при гематологическом синдроме]

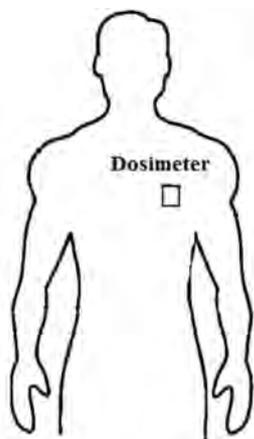


Fig. 3. The “typical” individual dosimeter position, i.e., 14 cm below the thyroid and 9 cm shifted to the side
[Рис. 3. Типичное расположение индивидуального дозиметра – 14 см ниже щитовидной железы со смещением вбок на 9 см]

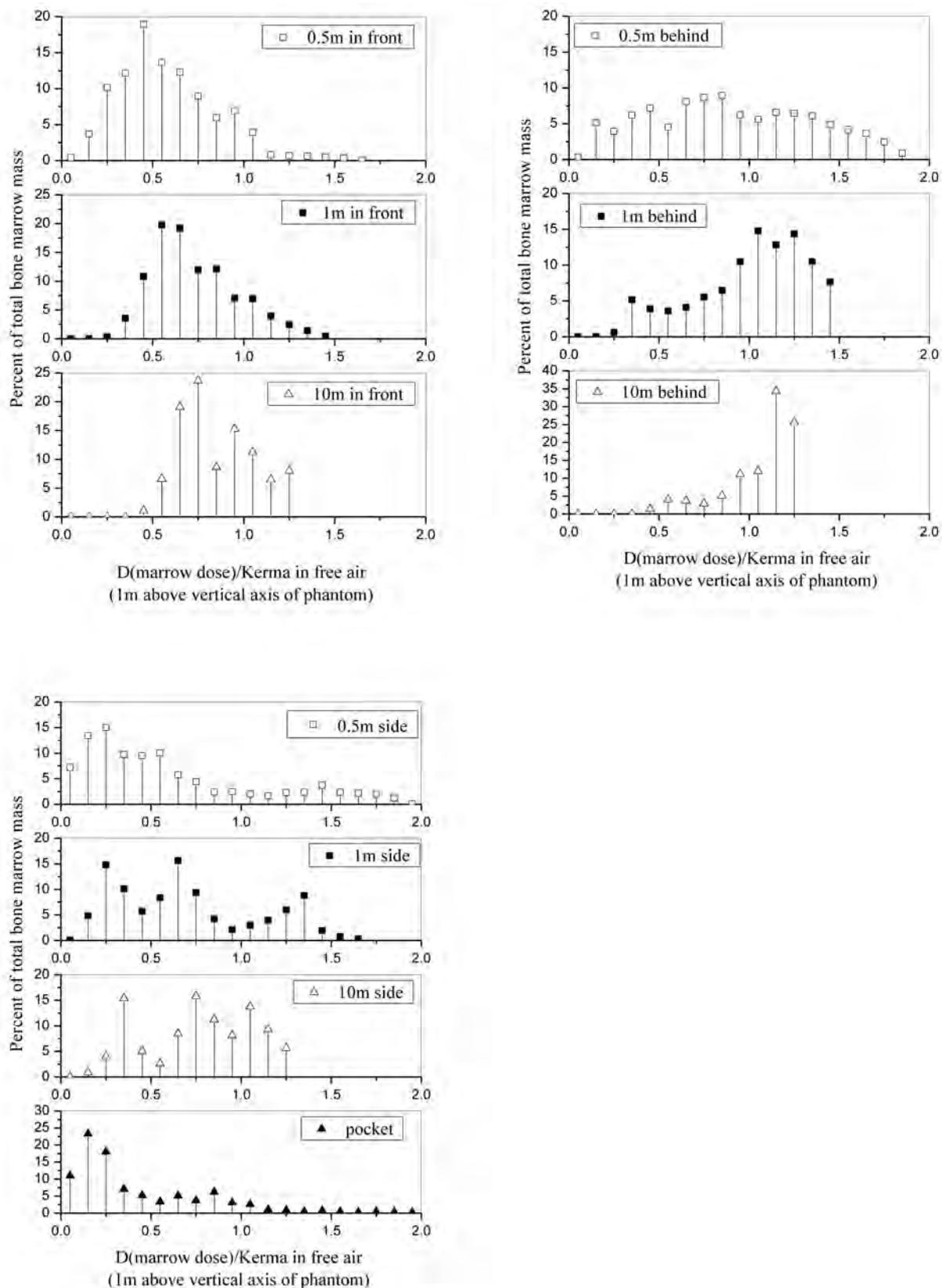


Fig. 4. The dose distribution of bone marrow cells for point ^{137}Cs source located on different distances in front, behind and side of phantom on the height 1m above floor

[Рис. 4. Распределение дозы в клетках красного костного мозга для точечного источника ^{137}Cs , расположенного на разных расстояниях спереди, сзади и сбоку от фантома на высоте 1 м над полом]

Table 1

Estimated hematopoietic mortality for different geometry of acute irradiation of man by ¹³⁷Cs source

[Таблица 1

Оцененная гематологическая смертность при остром облучении человека источником ¹³⁷Cs в различных геометриях]

Mortality,% [Смертность, %]	Kerma in free air (Gy) at a height of 1 m on the vertical axis of phantom [Керма в воздухе (Гр) на высоте 1 м на вертикальной оси фантома]									
	Source in front [Источник спереди]			Source behind [Источник сзади]			Source side [Источник сбоку]			
	10m	1m	0.5m	10m	1m	0.5m	10m	1m	0.5m	pocket
10	2.1	2.6	3.4	1.7	1.8	2.3	2.6	3.3	4.6	7.2
30	2.9	3.5	5.0	2.3	2.6	3.8	3.8	5.1	9.0	12.7
50	3.2	3.9	5.8	2.5	3.0	4.5	4.4	6.0	11.1	15.3
70	3.4	4.2	6.2	2.7	3.2	5.0	4.7	6.5	12.5	17.0
90	3.6	4.5	6.6	2.9	3.4	5.3	5.0	6.9	13.5	18.2

The results of calculations of marrow dose profiles (see Fig. 4) indicate that the closer the source is located to the human body the more non-uniformly separate parts of the red bone marrow are irradiated (wider dose distribution). That can be explained mainly due to the enhancement of the effect of inverse squares law. The most uniform distribution of the dose by mass of the RBM is observed for the source located at a distance of 10 m from the human body when the level of irradiation is determined mainly only by different absorption of radiation due to the different depth of the location in the body of separate parts of the RBM. The higher non-uniformity of the irradiation of the RBM at the same dose in the site of human location causes a greater probability of survival due to a greater proportion of RBM cells that have preserved the possibility of reproduction. The values of mean 50% lethal dose (LD₅₀) for cases of approximately uniform irradiation of the body surface (point source at a distance 10m) and sharply non uniform irradiation (point source at a distance of 0.5 m) differ approximately by a factor of 1.7 – 2.5 depending on the direction of irradiation. Due to the features of the distribution of the RBM in the human body irradiation from the source located behind of the human body is the most dangerous; from the source located on the side of the human body – is the least dangerous. For the case of ¹³⁷Cs source located in the trouser pocket the most significant effect is the severe local damage of the skin and tissues near the radiation source. For example, doses in the skin and in the tissues at a depth of 5 mm (averaged over an area of 100 cm² near the source) will be approximately two orders of magnitude higher compared to the average dose in the RBM [13]. A practically zero probability of death from the bone marrow syndrome (kerma in air at an height of 1 m on the phantom axis ~ 1Gy, the average RBM dose ~ 0.6 Gy) is accompanied by the absorbed doses in the skin and in the tissues at a depth of 5 mm averaged by area 100cm² near the source more than 100 Gy, which will lead to their death. It should also be noted that for the range of distances from the phantom less than 0.5m a combined damage of several critical systems, for example red bone marrow and gastrointestinal system, is possible, since the onset dose for the appearance of the first symptoms for gastrointestinal syndrome is approximately 6 Gy [6].

Hence, the cases of irradiation considered here can be classified on the basis of spatial areas where the type of acute radiation syndrome will be determined:

Далее постулировалось, что вероятность смерти для организма одинакова для одинаковых значений $S^{(L)}$ независимо от распределения дозы по массе ККМ. Доза D равномерного облучения, эквивалентная дозе L -го случая неравномерного облучения, рассчитывалась на основе значения $S^{(L)}$ (уравнение 1) и дозовой зависимости жизнеспособности клеток ККМ (см. рис. 1). Последний шаг заключался в расчете вероятности смерти организма в соответствии с дозовой зависимостью смертности для кроветворной формы ОРС [8] (рис. 2):

$$\text{Смертность (\%)} = \text{Exp}(3.84 + 5.35 \cdot \ln(D / LD_{50})), LD_{50} = 2.5 \text{ Gy} \quad (2)$$

Это же программное обеспечение [9] использовалось для расчета значений коэффициентов перехода от показаний индивидуального дозиметра, расположенного в «типичном» положении на поверхности тела (рис. 3), к значению эффективной дозы. Геометрия облучения аварийных работников соответствовала различным положениям точечного источника ¹³⁷Cs в переднем полупространстве относительно работника.

Результаты и обсуждение

Результаты расчета профилей поглощенной дозы по массе ККМ в случае точечного источника ¹³⁷Cs, расположенного спереди, сзади и сбоку от фантома на разных расстояниях (0,5 м, 1 м и 10 м) от его вертикальной оси, и в случае, когда он находился в контакте с фантомом (карман брюк), показаны на рисунке 4.

Далее эти данные использовались в соответствии с уравнением 1 для оценки выжившей фракции клеток ККМ для каждой ситуации облучения. После этого с использованием уравнения 2 были оценены вероятности смертности организма в случае кроветворной формы ОРС. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Результаты расчетов профилей дозы в клетках ККМ (см. рис. 4) указывают на то, что чем ближе источник расположен к телу человека, тем более неравномерно облучаются отдельные части ККМ (более широкое распределение дозы). Это может быть объяснено, главным образом, эффектом закона обратных квадратов. Наиболее равномерное распределение поглощенной дозы по массе ККМ наблюдается для источника, расположенного на расстоянии 10 м от человека. В этом случае уровень облучения отдельных частей ККМ определяется,

- damage to the hematopoietic system (“clear” bone marrow syndrome) – at the distance from a body more than ~ 50 cm;
- combined damage of several critical systems (red bone marrow and gastrointestinal system) – at the distance from a body less than ~ 50 cm;
- severe local damage to the skin and tissues located near the radiation source – when wearing the source in the pockets of clothes or hands.

Calculated conversion coefficients from the readings of the individual dosimeter (for “typical” dosimeter position) to the value of effective dose for different geometry of irradiation of emergency workers by ¹³⁷Cs source are shown in Table 2.

Values of these coefficients that are below unity indicate an overestimation of effective dose by personal dose, values above unity an underestimation. It can be seen that for all irradiation geometries personal dose is a conservative estimate or a close approximation of effective dose. The average value of the conversion coefficient from personal dose to effective dose for the considered exposure situations is 0.70 Sv Gy⁻¹ and 90% confidence interval 0.49 – 0.99 Sv Gy⁻¹. When applying Table 2 data to sources with radionuclides of ¹⁹²Ir and ⁶⁰Co an additional error will not exceed ± 20%.

Conclusions

The paper presents the data which demonstrate the severity of hematopoietic mortality for different irradiation geometry of man by ¹³⁷Cs (point source on different distances – 10m, 1m and 0.5m from the body). The values of mean lethal dose LD₅₀ for cases of approximately uniform irradiation of the body surface (point source at a distance 10m) and sharply non uniform irradiation (point source at a distance of 0.5 m) differ approximately in 1.7 – 2.5 times in dependence of direction of irradiation. The most dangerous is the irradiation from the source located behind of the human body and the least dangerous from the source located on the side of the human body. Additionally the values of conversion coefficients from the reading of an individual dosimeter located in the “typical” position on the surface of the body to the value of an effective dose when the ¹³⁷Cs point source located at distances 0.5 – 1m from the body were calculated. The average value of the conversion coefficient from personal dose to effective dose for

в основном, только различием в поглощении излучения, обусловленным различной глубиной их расположения в теле человека. Более высокая неоднородность облучения ККМ (при одинаковой дозе в воздухе в месте расположения человека) обуславливает большую вероятность выживания организма из-за большей доли клеток ККМ, облученных в малых дозах и поэтому сохранивших способность к воспроизведению. Значения средней 50% летальной дозы (LD₅₀) для случаев приблизительно равномерного облучения поверхности тела (точный источник на расстоянии 10 м) и резко неравномерного облучения (точный источник на расстоянии 0,5 м) отличаются примерно в 1,7–2,5 раза в зависимости от направления падения излучения. Благодаря особенностям распределения клеток ККМ в организме человека, облучение от источника, расположенного сзади по отношению к телу человека, является наиболее опасным, а от источника, расположенного сбоку от тела человека, – наименее опасно.

Для случая источника ¹³⁷Cs, расположенного в кармане брюк, наиболее значительным эффектом является тяжелое локальное поражение кожи и тканей, расположенных вблизи источника. Например, дозы в коже и тканях на глубине 5 мм (усредненные по площади 100 см² вблизи источника) будут приблизительно на два порядка выше по сравнению со средней дозой в ККМ [13]. В этом случае при практически нулевой вероятности смерти от кроветворной формы ОРС (керма в воздухе на высоте 1 м на оси фантома ~ 1Гр, средняя доза в ККМ ~ 0,6 Гр) поглощенные дозы в коже и в тканях на глубине 5 мм, усредненные по площади 100см² вблизи источника, будут более 100 Гр, что приведет к их омертвлению. Следует также отметить, что для диапазона расстояний источника от фантома менее 0,5 м возможно комбинированное радиационное поражение клеток нескольких критических систем, например, таких как ККМ и кишечник, поскольку пороговая доза появления первых симптомов кишечной формы ОРС составляет примерно 6 Гр [6]. Таким образом, случаи облучения, рассматриваемые здесь, могут быть классифицированы на основе пространственных зон с вероятным преобладанием следующих типов ОРС:

- поражение кроветворной системы («чистый» костномозговой синдром) – при расстояниях источника от тела более ~ 50 см;

[Table 2

Conversion coefficients from the readings of the individual dosimeter (for “typical” dosimeter position) to effective dose for different geometry of irradiation of emergency workers by ¹³⁷Cs source

[Таблица 2

[Коэффициенты перехода от показаний индивидуального дозиметра (типичная позиция на теле) к эффективной дозе для различных геометрий облучения аварийного персонала источником ¹³⁷Cs]

The height of source over the floor, cm [Высота источника над полом, см]	Conversion coefficients, Sv Gy ⁻¹ [Коэффициенты перехода, Зв Гр ⁻¹]			
	Source in front on the distance from the body [Источник спереди, на расстоянии от тела]		Source side on the distance from the body [Источник сбоку, на расстоянии от тела]	
	50 cm	100 cm	50 cm	100 cm
0	0.94	0.93	0.73	0.73
80	1.03	0.81	0.83	0.73
120	0.68	0.76	0.61	0.66
150	0.54	0.68	0.50	0.60
200	0.55	0.65	0.48	0.57

the considered exposure situations is 0.7 Sv Cy^{-1} and the 90% confidence interval is $0.49 - 0.99 \text{ Sv Gy}^{-1}$. Such kind of data is often necessary to assessing the effective dose in personnel who performs the work to liquidation the consequences of the accidents with sealed sources of gamma radiation.

References

1. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume II, Scientific Annexes C, D and E. New York, UN; 2011.
2. U.S. Department of Homeland Security. Technology Assessment and Roadmap for the Emergency Radiation Dose Assessment Program. UCRL-TR-215887. June, 2005.
3. National Council on Radiation Protection and Measurements. Management of terrorist events involving radioactive material. NCRP Report No. 138. Bethesda, Md: National Council on Radiation Protection and Measurements; 2001.
4. Avetisov GM, Darenskaya NG, Nelyubov AA. Biological effects of non-uniform radiation impacts. Moscow: Atomizdat; 1974.
5. Gozenbuk VL, Keirim-Markus IB. Dosimetric criteria for the severity of acute human irradiation. Moscow: Energoatomizdat; 1988.
6. Wolbarst AB, Wiley AL, Nemhauser JB, Christensen DM, Hendee WR. Medical response to a major radiologic emergency: a primer for medical and public health practitioners. *Radiology*. 2010;254: 660–677.
7. IAEA. Generic Procedures for Medical Response During a Nuclear or Radiological Emergency, Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency; 2005.
8. Jones TD. Hematologic Syndrome in Man Modeled from Mammalian Lethality. *Health Physics*. 1981;41: 83-103.
9. Golikov V. Method and software for photon dose calculation in phantoms of human body. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2): 55-65. (In Russian).
10. 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.
11. Snyder WS, Ford MR, Warner GG, Watson GG. Revision of MIRD Pamphlet No 5 Entitled 'Estimates of absorbed fractions for monoenergetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom' ORNL-4979. Tennessee: Oak Ridge National Laboratory; 1974.
12. Han EY, Bolch WE, Eckerman KF. Revisions to the ORNL series of adult and pediatric computational phantoms for use with the MIRD schema. *Health Physics*. 2006;90(4): 337–356.
13. Golikov V. Assessment of the absorbed doses in the organs in case of radiation emergency with the sealed gamma-sources. *Radiation Protection Dosimetry*. 2019;185(1): 67-73.

Received: April 27, 2022

– комбинированное повреждение нескольких критических систем (ККМ и кишечника) – при расстояниях источника от тела менее чем $\sim 50 \text{ см}$;

– тяжелое локальное поражение кожи и тканей, расположенных вблизи источника излучения, – при контакте источника с телом человека (его ношение в карманах одежды или руках).

Рассчитанные значения коэффициентов перехода от показаний индивидуального дозиметра (для «типичной» локации дозиметра на поверхности тела) к эффективной дозе для различных геометрий облучения аварийных работников гамма-излучением точечного источника ^{137}Cs представлены в таблице 2.

Значения этих коэффициентов ниже 1 указывают на переоценку эффективной дозы на основе измерений индивидуального дозиметра, а значения больше 1 – на ее недооценку. Можно видеть, что для всех геометрий облучения доза, зарегистрированная индивидуальным дозиметром, является консервативной оценкой эффективной дозы или близка к ней.

Среднее значение коэффициента перехода от дозы, зарегистрированной индивидуальным дозиметром, к эффективной дозе для рассматриваемых ситуаций облучения составило $0,70 \text{ Sv Gy}^{-1}$ при 90% доверительном интервале $0,49-0,99 \text{ Sv Gy}^{-1}$. При использовании данных таблицы 2 для закрытых источников с радионуклидами ^{192}Ir и ^{60}Co дополнительная ошибка в оценке значений коэффициентов перехода не будет превышать $\pm 20\%$.

Заключение

В статье представлены данные, демонстрирующие зависимость тяжести радиационного поражения организма человека в случае кроветворной формы ОРС для различной геометрии облучения гамма-излучением точечного источника ^{137}Cs , расположенного на разных расстояниях (10 м, 1 м и 0,5 м) от тела человека. Значения средней летальной дозы LD_{50} для случаев приблизительно равномерного облучения поверхности тела (точечный источник на расстоянии 10 м) и резко неравномерного облучения (точечный источник на расстоянии 0,5 м) различаются приблизительно в 1,7–2,5 раза в зависимости от направления падения излучения. Наиболее опасным является облучение от источника, расположенного сзади по отношению к телу человека, а наименее опасным – от источника, расположенного сбоку от тела человека. Кроме того, были рассчитаны значения коэффициентов перехода от показаний индивидуального дозиметра, находящегося в «типичном» положении на поверхности тела работника, к эффективной дозе. Геометрия облучения соответствовала различным положениям точечного источника ^{137}Cs в переднем полупространстве на расстоянии $0,5-1 \text{ м}$ относительно работника. Среднее значение коэффициента перехода от дозы, зарегистрированной индивидуальным дозиметром, к эффективной дозе составило $0,70 \text{ Sv Gy}^{-1}$ при 90% доверительном интервале $0,49-0,99 \text{ Sv Gy}^{-1}$. Такие данные часто необходимы для оценки эффективной дозы у персонала, выполняющего работы по ликвидации последствий аварийных ситуаций облучения с закрытыми источниками гамма-излучения.

Литература

1. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume II, Scientific Annexes C, D and E. New York, UN, 2011.
2. U.S. Department of Homeland Security. Technology Assessment and Roadmap for the Emergency Radiation Dose Assessment Program. UCRL-TR-215887. June, 2005.
3. National Council on Radiation Protection and Measurements. Management of terrorist events involving radioactive material. NCRP Report No. 138. Bethesda, Md: National Council on Radiation Protection and Measurements, 2001.
4. Аветисов Г.М., Даренская Н.Г., Нелюбов А.А. Биологические эффекты неравномерных лучевых воздействий. М.: Атомиздат, 1974.
5. Гозенбук В.Л., Кеирим-Маркус И.Б. Дозиметрические критерии тяжести острого облучения человека. М.: Энергоатомиздат, 1988.
6. Wolbarst A.B., Wiley A.L., Nemhauser J.B., et al. Medical response to a major radiologic emergency: a primer for medical and public health practitioners // *Radiology*. 2010. No. 254. P. 660–677.
7. IAEA. Generic Procedures for Medical Response During a Nuclear or Radiological Emergency, Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, 2005.
8. Jones T.D. Hematologic syndrome in man modeled from mammalian lethality // *Health Physics*. 1981. No. 41. P. 83-103.
9. Голиков В.Ю. Метод и компьютерная программа расчета доз фотонного излучения в фантомах тела человека // *Радиационная гигиена*. 2019. Т.12, № 2. С. 55-65.
10. 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.
11. Snyder W.S., Ford M.R., Warner G.G., et al. Revision of MIRD Pamphlet No 5 Entitled 'Estimates of absorbed fractions for monoenergetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom'. ORNL-4979. Tennessee: Oak Ridge National Laboratory, 1974.
12. Han E.Y., Bolch W.E., Eckerman K.F. Revisions to the ORNL series of adult and pediatric computational phantoms for use with the MIRD schema // *Health Physics*. 2006. Vol. 90, No. 4. P. 337–356.
13. Golikov V. Assessment of the absorbed doses in the organs in case of radiation emergency with the sealed gamma-sources // *Radiation Protection Dosimetry*. 2019. Vol. 185, No. 1. P. 67-73.

Поступила: 27.04.2022 г.

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

Aleksandr V. Vodovatov – PhD, Researcher, Head 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; Associate Professor of the Department of Hygiene of Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

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

Водоватов Александр Валерьевич – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией радиационной гигиены медицинских организаций, ведущий научный сотрудник 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 гигиены, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

For citation: Golikov V.Yu., Vodovатов A.V. Influence of the irradiation geometry on the severity of acute radiation damage. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 2, P. 31-41. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-2-31-41

Для цитирования: Голиков В.Ю., Водоватов А.В. Влияние геометрии облучения на тяжесть острого радиационного поражения // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 2. С. 31-41. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-2-31-41