

Научная статья

## ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ РИСК И ДОЗОВЫЕ ПОРОГИ С УЧЕТОМ ИХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ДЛЯ ОСТРОЙ ЛУЧЕВОЙ БОЛЕЗНИ РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ ТЯЖЕСТИ

С.В. Осовец

Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики, Российская Федерация, 456780, г. Озерск, Озерское шоссе, 19

Осуществлена оценка дозовых порогов и их неопределенностей для острой лучевой болезни (ОЛБ) различной степени тяжести, а также вычислен относительный риск (ОР) перехода от предыдущей к более высокой степени тяжести ОЛБ. Объектом исследования стали 104 человека с ОЛБ, развившейся в результате ликвидации последствий радиационной аварии на Чернобыльской атомной электростанции в 1986 г., о которых в литературе есть доступные данные о степени тяжести ОЛБ и верифицированных дозах внешнего  $\gamma$ - $\beta$ -излучения.

Эмпирические дозовые распределения по каждой группе с конкретной степенью тяжести ОЛБ были аппроксимированы функциями распределения на основе модели Вейбулла; дозовые пороги ( $D_0$ ) и их неопределенности ( $U$ , %) были вычислены при рассмотрении попарно функции распределения для изучаемых групп; ОР перехода от предыдущей к более высокой степени тяжести ОЛБ рассчитаны с помощью четырехпольных таблиц. Результаты расчетов представлены в работе попарно в соответствии с группами степени тяжести ОЛБ: группы I–II ( $D_0 = 1,95$  Гр;  $U = 9,38$  %;  $OP = 3,05$ ), группы II–III ( $D_0 = 3,96$  Гр;  $U = 4,63$  %;  $OP = 5,93$ ), группы III–IV ( $D_0 = 6,13$  Гр;  $U = 6,81$  %;  $OP = 8,82$ ).

Результаты имеют не только научное, но и практическое значение, так как позволяют точнее прогнозировать степень тяжести ОЛБ при наличии информации о полученных дозах внешнего облучения при радиационной аварии. В работе также предлагается на основании анализа полученных результатов в перспективе скорректировать регламентируемый диапазон доз для IV степени тяжести костномозгового синдрома ОЛБ.

**Ключевые слова:** острая лучевая болезнь, степень тяжести, дозовый порог, неопределенность, относительный риск, радиационная авария, Чернобыльская атомная электростанция, моделирование.

Сегодняшнее развитие атомной энергетики и технологий, связанных с переработкой и получением источников ионизирующего излучения, диктует особое отношение к проблемам радиационной безопасности и радиационной медицины. Несмотря на соблюдение норм радиационной безопасности и внедрение методов автоматизации и контроля на ядерных производствах и атомных станциях, крайне малая вероятность возникновения радиационных аварий, как показывает практика, все же не исключена [1–7]. В настоящее время также остается вполне реальной угрозой ядерного терроризма как в локальном, так и в глобальном масштабе. Результатом таких аварий и инцидентов может быть острая лучевая болезнь (ОЛБ). При костномозговой форме ОЛБ установлена не только пороговая доза, но и закономерное увеличение степени тяжести с увеличением дозы облучения<sup>1</sup> [8–10]. В ряде предыдущих наших исследований и публикаций подробно рассматривались методы оценки дозовых порогов и вычислений

их неопределенностей для заболеваемости и смертности от ОЛБ у работников производственного объединения «Маяк» [11–13].

В научной литературе представлен обширный и подробный материал по случаям ОЛБ, развившейся в результате ликвидации последствий аварии на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС) в 1986 г. [14–19].

**Цель исследования** – оценка дозовых порогов и их неопределенностей для ОЛБ различной степени тяжести для лиц, пострадавших в результате ликвидации последствий аварии на ЧАЭС.

**Материалы и методы.** В настоящей работе использованы данные субкогорты, состоящей из 104 человек, пострадавших в результате радиационной аварии на ЧАЭС, включающие оценки доз внешнего  $\gamma$ - $\beta$ -излучения и степени тяжести ОЛБ, опубликованные в двухтомном издании «Атласа по острой лучевой болезни человека» (часть I) [19]. Авторы данной публикации подчеркивают, что че-

© Осовец С.В., 2026

Осовец Сергей Васильевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник (e-mail: clinic@subi.su; тел.: 8 (351) 302-93-95; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6180-2061>).

<sup>1</sup> Гуськова А.К., Байсоголов Г.Д. Лучевая болезнь человека. – М.: Медицина, 1971. – 382 с.

рез некоторое время после поступления пострадавших в специализированный стационар клинической больницы № 6 г. Москвы была проведена верификация диагнозов с учетом всей медицинской информации (гематологических, биохимических, иммунологических, физиологических и других параметров наблюдений за пациентами). Помимо этого, В.Ю. Нугис с сотрудниками провели дополнительную верификацию доз облучения лиц, пострадавших в аварии, методом биологической дозиметрии [20]. По степеням тяжести ОЛБ 104 человека с верифицированными дозами распределились следующим образом: I степень – 25 человек, II степень – 42, III степень – 20 и IV степень – 17.

Для достижения поставленной в настоящем исследовании цели – оценки риска и дозовых порогов (с их неопределенностями) между различными степенями тяжести ОЛБ – требовалось последовательное выполнение следующих этапов: во-первых, аппроксимации эмпирических дозовых распределений по каждой группе с конкретной степенью тяжести ОЛБ функциями распределения на основе модели Вейбулла; во-вторых, рассматривая попарно функции распределения для изучаемых групп пострадавших, вычислить дозовые пороги; на третьем, заключительном этапе оценить неопределенности полученных дозовых порогов и рассчитать ОР перехода от предыдущей к более высокой степени тяжести ОЛБ.

Для аппроксимации эмпирических распределений доз по степени тяжести ОЛБ использовалась модель Вейбулла [11], которая имеет следующий вид:

$$F(D) = 1 - \exp \left[ -\ln 2 \left( \frac{D}{D_{50}} \right)^V \right], \quad (1)$$

$$f(D) = \frac{V \ln 2 \left( \frac{D}{D_{50}} \right)^{V-1}}{D_{50}} \exp \left[ -\ln 2 \left( \frac{D}{D_{50}} \right)^V \right], \quad (2)$$

где  $F(D)$  – функция распределения;  
 $f(D)$  – плотность распределения;  
 $D$  – поглощенная доза;  
 $V$  – параметр формы распределения;  
 $D_{50}$  – медианная доза (обобщенное выражение), которая представляет собой медианную эффективную дозу, если рассматриваются нелетальные тканевые эффекты, или медианную летальную дозу, если изучаются летальные эффекты.

Параметры данной модели ( $D_{50}$  и  $V$ ) удобно оценивать методом наименьших квадратов, используя подраздел «Нелинейный регрессионный анализ»

пакета Statistica<sup>2</sup>. В результате таких расчетов параметры распределения Вейбулла будут определены вместе со своими стандартными ошибками:  $D_{50} \pm \Delta D_{50}$  и  $V \pm \Delta V$ .

Как было показано ранее [11], эффективный метод оценки дозовых порогов основан на использовании метода функций распределений для основной группы и группы сравнения, полученных на основе модели Вейбулла (формула (1)).

Пороговое значение дозы ( $D_0$ ) находится из следующего нелинейного уравнения:

$$\exp \left[ -\ln 2 \left( \frac{D_0}{D_{50}^{(2)}} \right)^{V^{(2)}} \right] + \exp \left[ -\ln 2 \left( \frac{D_0}{D_{50}^{(1)}} \right)^{V^{(1)}} \right] - 1 = 0, \quad (3)$$

где верхний индекс <sup>(1)</sup> относится к группе сравнения, а верхний индекс <sup>(2)</sup> – к основной группе.

Термин «*дозовый порог*» определяется в идеале как часть дозы облучения, при которой не наблюдается изучаемый эффект воздействия радиации на организм (хотя в действительности величина дозового порога всегда характеризуется в том числе и неопределенностью) [21, 22].

Для оценки среднеквадратичной ошибки дозового порога  $D_0$ , вычисляемого из уравнения (3) итерационным методом Ньютона – Рафсона<sup>3</sup>, необходимо использовать неявно заданную функцию от четырех параметров:

$$F(D_{50}^{(1)}, V^{(1)}, D_{50}^{(2)}, V^{(2)}, D_0) = 0, \quad (4)$$

которая по аналитической форме совпадает с левой частью равенства (3), учитывая при этом, что  $D = D_0$ .

Для оценки неопределенности дозовых порогов, полученных методом функций распределений, обозначим левую часть уравнения (3) символом  $F$ :

$$F(D) = \exp \left[ -\ln 2 \left( \frac{D_0}{D_{50}^{(2)}} \right)^{V^{(2)}} \right] + \exp \left[ -\ln 2 \left( \frac{D_0}{D_{50}^{(1)}} \right)^{V^{(1)}} \right] - 1, \quad (5)$$

где пороговые значения  $D = D_0$  и параметры распределения для основной группы ( $D_{50}^{(2)}, V^{(2)}$ ) и группы сравнения ( $D_{50}^{(1)}, V^{(1)}$ ) своими стандартными отклонениями известны. Тогда стандартное отклонение для дозового порога  $D_0$  можно вычислить, используя формулу переноса ошибок<sup>4</sup>:

<sup>2</sup> Боровиков В. Statistica. Искусство анализа данных на компьютере. – СПб.: Питер, 2003. – 688 с.

<sup>3</sup> Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2011. – 632 с.

<sup>4</sup> Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.

$$\sigma_{D_0} = \sqrt{\left(\frac{F_{D_{50}^{(1)}}}{F}\right)^2 \sigma_{D_{50}^{(1)}}^2 + \left(\frac{F_{V^{(1)}}}{F}\right)^2 \sigma_{V^{(1)}}^2 + \left(\frac{F_{D_{50}^{(2)}}}{F}\right)^2 \sigma_{D_{50}^{(2)}}^2 + \left(\frac{F_{V^{(2)}}}{F}\right)^2 \sigma_{V^{(2)}}^2}, \quad (6)$$

где  $F_{D_{50}^{(1)}}$ ,  $F_{V^{(1)}}$ ,  $F_{D_{50}^{(2)}}$ ,  $F_{V^{(2)}}$  – частные производные функции  $F$  по соответствующим параметрам:

$$F_{D_{50}^{(1)}} = \frac{D_0 V^{(1)} \ln 2 \left(\frac{D_0}{D_{50}^{(1)}}\right)^{V^{(1)}-1}}{\left(D_{50}^{(1)}\right)^2} \cdot \exp\left[-\ln 2 \left(\frac{D_0}{D_{50}^{(1)}}\right)^{V^{(1)}}\right], \quad (7)$$

$$F_{V^{(1)}} = -\ln 2 \left(\frac{D_0}{D_{50}^{(1)}}\right)^{V^{(1)}} \cdot \ln\left(\frac{D_0}{D_{50}^{(1)}}\right) \times \exp\left[-\ln 2 \left(\frac{D_0}{D_{50}^{(1)}}\right)^{V^{(1)}}\right], \quad (8)$$

$$F_{D_{50}^{(2)}} = \frac{D_0 V^{(2)} \ln 2 \left(\frac{D_0}{D_{50}^{(2)}}\right)^{V^{(2)}-1}}{\left(D_{50}^{(2)}\right)^2} \cdot \exp\left[-\ln 2 \left(\frac{D_0}{D_{50}^{(2)}}\right)^{V^{(2)}}\right], \quad (9)$$

$$F_{V^{(2)}} = -\ln 2 \left(\frac{D_0}{D_{50}^{(2)}}\right)^{V^{(2)}} \cdot \ln\left(\frac{D_0}{D_{50}^{(2)}}\right) \times \exp\left[-\ln 2 \left(\frac{D_0}{D_{50}^{(2)}}\right)^{V^{(2)}}\right]. \quad (10)$$

Относительная неопределенность дозового порога ( $U$ , %) будет тогда вычисляться по следующей формуле:

$$U = \frac{\sigma_{D_0}}{D_0}. \quad (11)$$

ОР от воздействия дозового фактора при переходе от предыдущей степени тяжести ОЛБ к последующей более высокой степени оценивался с помощью четырехпольных таблиц. Алгоритм такого расчета ОР для различных степеней тяжести ОЛБ на основе четырехпольных частотных таблиц в самом общем виде можно представить следующим образом. Пусть в качестве исходного статистического материала имеется четырехпольная таблица, содержащая частоты  $a$  и  $c$  для основной группы и частоты  $b$  и  $d$  для группы сравнения (табл. 1).

В табл. 1  $D_0$  – дозовый порог между степенями тяжести ОЛБ. Основная группа ( $a + c$ ) включает индивидов с более высокой степенью тяжести ОЛБ, а группа сравнения ( $b + d$ ) – с предыдущей, менее

высокой степенью тяжести ОЛБ. Сумма частот ( $a + b$ ) – это объединенная группа, в которой индивиды получили дозы, превышающие пороговую ( $D > D_0$ ), а сумма частот ( $c + d$ ) – это объединенная группа, в которой индивиды получили дозы меньше пороговой ( $D < D_0$ ). ОР в этом случае можно рассчитать по формуле:<sup>5</sup>

$$OP = \frac{a/(a+b)}{c/(c+d)}. \quad (12)$$

Т а б л и ц а 1

Распределение гипотетических частот основной группы и группы сравнения в зависимости от дозы облучения ( $D$ ) сравнительно с пороговой дозой ( $D_0$ )

Доза облучения	Основная группа	Группа сравнения
$D > D_0$	$a$	$b$
$D < D_0$	$c$	$d$

Таким образом, величина ОР в нашем исследовании представляет собой отношение долей заболевших (коэффициентов заболеваемости) с высокой степенью тяжести ОЛБ для двух вышеуказанных объединенных групп. Следует также отметить, что величина ОР ограничена снизу: ОР = 1 (при  $a = b = c = d$ ), но не ограничена сверху.

**Результаты и их обсуждение.** Прежде чем перейти к анализу полученных результатов и их обсуждению, необходимо напомнить следующие важные регламентирующие положения, связанные с ОЛБ [23]. Во-первых, в соответствии с общепринятой классификацией выделяют следующие формы ОЛБ с характерными дозовыми диапазонами:

1. Костномозговая форма формируется при дозах облучения от 1 до 10 Гр, в рамках которой в зависимости от дозы выделяют различные степени тяжести заболевания:

I – легкая степень, при дозах 1,0–2,0 Гр;

II – средняя степень, при дозах 2,1–4 Гр;

III – тяжелая степень, при дозах 4,1–6,0 Гр;

IV – крайне тяжелая степень, при дозах 6,1–10,0 Гр.

2. Кишечная форма формируется при дозах облучения 11–20 Гр (летальный исход на 8–10-е сут).

3. Токсемическая форма – при дозах облучения 21–50 Гр (летальный исход на 4–7-е сут).

4. Церебральная форма – при дозах облучения более 50 Гр (летальный исход на 1–3-е сут).

Во-вторых, верификация и оценка степени тяжести ОЛБ у лиц, пострадавших в результате радиационных аварий, проводится экспертами (специалистами в области радиационной медицины) в процессе тщательного анализа медицинских и лабораторных данных и с учетом полученных доз облучения.

<sup>5</sup> Флетчер Р., Флетчер С., Вагнер Э. Клиническая эпидемиология. Основы доказательной медицины / пер. с англ. под общ. ред. С.Е. Башинского, С.Ю. Варшавского. – М.: Медиа Сфера, 1998. – 352 с.

Таблица 2

Статистические характеристики дозовых распределений для групп с ОЛБ, облученных с различной степенью тяжести

Статистические характеристики дозовых распределений	Группа I (25 человек)	Группа II (42 человека)	Группа III (20 человек)	Группа IV (17 человек)
Среднее, Гр	1,41	3,07	5,43	10,78
Стандартная ошибка, Гр	0,18	0,18	0,37	0,59
Стандартное отклонение, Гр	0,91	1,18	1,65	2,45
Медиана, Гр	1,20	3,00	5,45	10,50
Минимум–максимум, Гр	0,30–3,70	1,00–5,80	2,30–9,30	7,00–15,20

Примечание: номер группы и соответствующая степень тяжести ОЛБ обозначены одинаковыми римскими цифрами.

Таблица 3

Параметры модели Вейбулла для дозовых распределений в изучаемых группах лиц с ОЛБ различной степени тяжести

Группы	Параметры модели		Коэффициент детерминации $R^2$	Сумма квадратов отклонений $S^2$
	$D_{50} \pm \Delta D_{50}$ , Гр	$V \pm \Delta V$		
Группа I	$1,197 \pm 0,023$ ( $p < 10^{-5}$ )	$1,802 \pm 0,101$ ( $p < 10^{-5}$ )	0,977	0,048
Группа II	$2,972 \pm 0,012$ ( $p < 10^{-5}$ )	$2,878 \pm 0,052$ ( $p < 10^{-5}$ )	0,996	0,015
Группа III	$5,311 \pm 0,056$ ( $p < 10^{-5}$ )	$3,762 \pm 0,229$ ( $p < 10^{-5}$ )	0,988	0,038
Группа IV	$10,542 \pm 0,073$ ( $p < 10^{-5}$ )	$4,565 \pm 0,214$ ( $p < 10^{-5}$ )	0,994	0,017

Примечание:  $S^2$  – сумма квадратов отклонений эмпирических данных от расчетных;  $p$  – уровень значимости параметров модели Вейбулла.

В табл. 2 представлено описание дозовых распределений для четырех групп пострадавших в результате аварии на ЧАЭС с различной степенью тяжести ОЛБ [19]. Из данных табл. 2 видно, что группа I и II по статистическому объему суммарно почти в два раза больше, чем группа III и IV, а именно 67 и 37 человек соответственно. Как следствие, вариация полученных доз в первых двух группах меньше, чем в последующих двух группах, этот факт демонстрирует такой показатель, как величина стандартного отклонения. С другой стороны, во всех четырех группах такие показатели, как среднее и медиана, различаются незначительно, а минимальные и максимальные значения доз по степени тяжести ОЛБ везде выходят за пределы регламентированных выше дозовых диапазонов.

Такая ситуация с вариабельностью доз по степени тяжести ОЛБ вполне объяснима не только погрешностью измеренных и расчетных доз внешнего облучения, но и другими существенными моментами. Во-первых, при ретроспективном анализе пострадавших от ОЛБ специалисты (эксперты) в области радиационной медицины скрупулезно анализируют целый комплекс медицинских данных и лабораторных исследований по каждому человеку (время наступления первичной рвоты, время начала и разгара болезни, латентный период ОЛБ, время наступления агранулоцитоза, показатели крови, результаты иммунологического анализа и т.д.). Во-вторых, значитель-

ную роль также играет индивидуальная радиочувствительность и состояние иммунной системы больного. Вся эта информация и позволяет экспертам объективно решать вопрос об отнесении ОЛБ у пострадавшего в радиационной аварии человека к той или иной степени тяжести и принять адекватные меры лечения. Дозовые распределения ОЛБ по степени тяжести имеют особую ценность для последующего углубленного статистического анализа и математического моделирования.

В табл. 3 представлены результаты расчетов параметров по модели Вейбулла различных дозовых распределений, относящихся к группам с различной степенью тяжести ОЛБ.

Расчетные данные в табл. 3 показывают, что модель Вейбулла, несмотря на относительно небольшой объем исходного эмпирического материала, хорошо аппроксимирует дозовые распределения во всех четырех группах. Коэффициенты детерминации ( $R^2$ ) варьируются в достаточно узком диапазоне от 0,977 до 0,996. Все модели в группах по степени тяжести ОЛБ были статистически значимы ( $p < 0,05$ ) по  $F$ -критерию Фишера, а их параметры ( $D_{50}$  и  $V$ ) имеют статистическую значимость ( $p < 10^{-5}$ ) по  $t$ -критерию Стьюдента. Таким образом, необходимый базис для дальнейших расчетов дозовых порогов и их неопределенностей между группами пострадавших от радиационной аварии с ОЛБ различной степени тяжести полностью сформирован. В качестве примера

в виде графической иллюстрации на рисунке представлены рассчитанные плотности распределений для первой и второй степени тяжести ОЛБ (соответственно  $f^{(1)}(D)$  и  $f^{(2)}(D)$ ).

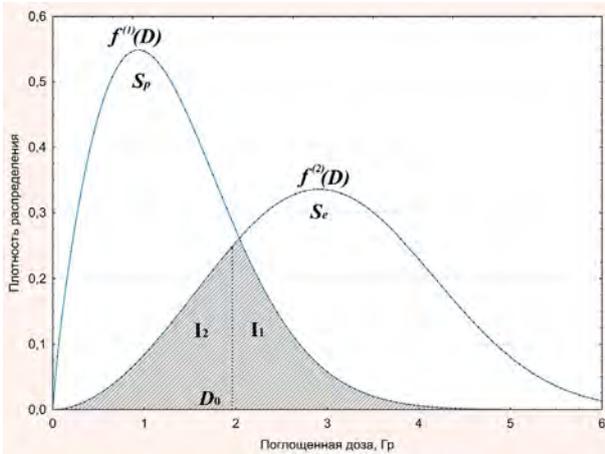


Рис. Плотности дозовых распределений для группы сравнения  $f^{(1)}(D)$  и основной группы  $f^{(2)}(D)$

Из рисунка видно, область перекрытия плотностей дозовых распределений для группы сравнения  $f^{(1)}(D)$  и основной группы  $f^{(2)}(D)$  довольно значительна и составляет величину порядка  $\sim 19\%$  от суммарной площади двух распределений. Как было показано в наших предыдущих исследованиях [11–13], в качестве дозового порога ( $D_0$ ) более точной и надежной величиной является не точка пересечения плотностей распределения для группы сравнения и основной группы, а медиана области перекрытия (см. рисунок, в этом случае площади  $I_1 = I_2$  равны и соответственно чувствительность  $Se$  и специфичность  $Sp$  также совпадают по величине:  $Se = Sp = x$ ). Величину  $D_0$  можно рассчитать, решая итерационным методом следующее нелинейное уравнение:

$$\exp\left[-\ln 2 \left(\frac{D_0}{D_{50}^{(2)}}\right)^{V^{(2)}}\right] + \exp\left[-\ln 2 \left(\frac{D_0}{D_{50}^{(1)}}\right)^{V^{(1)}}\right] - 1 = 0, \quad (13)$$

где индекс  $(1)$  относится к группе сравнения, а верхний индекс  $(2)$  – к основной группе.

После нахождения  $D_0$ , используя вышеприведенные формулы, можно оценить неопределенность дозового порога ( $U, \%$ ). В табл. 4 представлены результаты расчетов.

Анализ результатов, представленных в табл. 4, показывает, что дозовые пороги между различными парными группами по степени тяжести ОЛБ, а также их неопределенность соответствуют регламентирующим требованиям и классификации костномозговой формы ОЛБ по степеням тяжести [23].

Следует также отметить, что дозовые границы порога  $D_0$ , представленные в последнем столбце табл. 4, позволяют уточнить для участников аварии

на ЧАЭС степень тяжести ОЛБ. Например, в границы неопределенности дозового порога  $D_0$  между I и II степенью тяжести ОЛБ (1,77–2,14 Гр) попадают 5 человек с I степенью тяжести и 4 человека со II; в дозовые границы порога между II и III степенью тяжести (3,78–4,14 Гр) – 4 человека со II степенью тяжести; в дозовые границы между III и IV степенью тяжести (5,71–6,66 Гр) – 2 человека с III степенью тяжести и 3 человека с IV степенью тяжести ОЛБ. Таким образом, из всего контингента пострадавших в радиационной аварии (104 человека) у 18 человек может быть уточнен прогноз степени тяжести ОЛБ.

Таблица 4

Дозовые пороги и их неопределенности между группами облученных с ОЛБ различной степени тяжести

Парные группы по степени тяжести	Межгрупповой дозовый порог $D_0$ , Гр	Относительная неопределенность $U, \%$	Дозовые границы порога $D_0$ , Гр
Группы I–II	1,95	9,38	1,77–2,14
Группы II–III	3,96	4,63	3,78–4,14
Группы III–IV	6,13	6,81	5,71–6,55

Важным моментом настоящего исследования является тот факт, что дозовые пороги между различными степенями тяжести ОЛБ (первый столбец табл. 4) являются медианными значениями области перекрытия (рисунок). Это предоставляет возможность расчета ОР при переходе от предшествующей степени тяжести ОЛБ к последующей более высокой степени тяжести с помощью четырехпольных таблиц. Для этого надо предварительно оценить чувствительность ( $Se$ ) и специфичность ( $Sp$ ) от воздействия дозового фактора при переходах I–II, II–III, и III–IV. Это можно рассчитать с помощью следующего нелинейного уравнения:

$$\exp\left[-\ln 2 \left(\frac{D_{50}^{(1)}}{D_{50}^{(2)}}\right)^{V^{(2)}} \left(-\frac{\ln(1-x)}{\ln 2}\right)^{\frac{V^{(2)}}{V^{(1)}}}\right] - x = 0, \quad (14)$$

где  $Se = Sp = x$ , а параметры модели Вейбулла  $D_{50}^{(1)}, V^{(1)}, D_{50}^{(2)}, V^{(2)}$  относятся к группе сравнения и основной группе соответственно. Величина  $x$  находится методом итераций.

В результате для степени тяжести I–II получаем:  $x = 0,813$  (81,3 %), для II–III:  $x = 0,795$  (79,5 %), и для III–IV:  $x = 0,886$  (88,6 %). Далее, зная количество человек в каждой группе, распределенных по степени тяжести ОЛБ (см. табл. 2), можно составить необходимые четырехпольные таблицы для расчета оценок ОР (табл. 5–7).

В качестве примера вначале более подробно рассмотрим составление и расчет табл. 5, в которой

представлена оценка ОР для перехода ОЛБ от степени тяжести I к степени тяжести II. В основную группу II включены 42 человека (см. табл. 1), следовательно, умножая 42 на показатель чувствительности  $Se = x = 0,813$ , получаем  $42 \cdot 0,813 \approx 34$  человека при  $D > D_0$  и 8 человек при  $D < D_0$ . Аналогично, зная, что в группу сравнения I включены 25 человек, умножаем это число на показатель специфичности  $Sp = x = 0,813$ , получаем 20 ( $D < D_0$ ) и 5 человек ( $D > D_0$ ). В результате четырехпольная таблица сформирована (см. табл. 5), и по формуле (12) рассчитывается  $OP = 3,05$ . Далее, зная величину  $x = 0,795$  для перехода степеней тяжести II–III и величину  $x = 0,886$  для степеней тяжести III–IV, по аналогичной схеме составляются четырехпольные таблицы и оценивается ОР (табл. 6, 7).

Таблица 5

Оценка ОР перехода ОЛБ от степени тяжести I к степени тяжести II

Порог $D_0 = 1,95$ Гр	Основная группа II	Группа сравнения I	ОР
$D > D_0$	34	5	3,05
$D < D_0$	8	20	

Таблица 6

Оценка ОР перехода ОЛБ от степени тяжести II к степени тяжести III

Порог $D_0 = 3,96$ Гр	Основная группа III	Группа сравнения II	ОР
$D > D_0$	16	9	5,93
$D < D_0$	4	33	

Таблица 7

Оценка ОР перехода ОЛБ от степени тяжести III к степени тяжести IV

Порог $D_0 = 6,13$ Гр	Основная группа IV	Группа сравнения III	ОР
$D > D_0$	15	2	8,82
$D < D_0$	2	18	

Из четырехпольных табл. 5–7 и вычисленных по ним показателей ОР видно, что он существенно возрастает с увеличением дозы при парных переходах от предшествующей к последующей степени тяжести ОЛБ: I–II ( $OP = 3,05$ ), II–III ( $OP = 5,93$ ), III–IV ( $OP = 8,82$ ). Такие оценки ОР для всех степеней тяжести ОЛБ у лиц, подвергшихся внешнему облучению в результате аварии на ЧАЭС (104 человека), выполнены впервые. В дальнейшем они могут быть использованы не только в научном, но и в практическом плане. Например, В.И. Тельнов с соавт. [24] недавно показали, что относительный риск снижения продолжительности жизни у работников ПО «Маяк» после острой лучевой болезни разной степени тяжести статистически значимо возрастает в объединенной группе с III–IV степенями тяжести ОЛБ, по сравнению с предыдущей объединенной

группой с I–II степенями тяжести ОЛБ. Объединение групп с различной степенью тяжести в этой работе было обусловлено сравнительно небольшим объемом исходных данных (58 человек). В настоящей работе объем пострадавших от острого аварийного облучения в Чернобыльской аварии составляет 104 человека, что в принципе позволяет провести в будущем аналогичное исследование более детально. Следующим существенным моментом настоящего исследования для данного контингента является тот факт, что в группе с IV степенью тяжести медианное значение дозы составляет  $\sim 10,5$  Гр, а диапазон доз варьируется от 7 до 15,2 Гр (см. табл. 2), т.е. правая граница доз значительно превышает рекомендуемые дозовые границы 6–10 Гр [25]. С другой стороны, в недавних клинических рекомендациях А.С. Самойлова с соавт. [23], которые посвящены диагностике и лечению костномозговой формы ОЛБ, подчеркивается, что при превышении поглощенной дозы внешнего облучения 10 Гр и выше, до 13 Гр, еще возможно лечение больных с помощью пересадки донорского костного мозга, но при дальнейшем увеличении аварийной дозы смертельный исход неизбежен. Эти факты предоставляют нам возможность в дальнейших исследованиях скорректировать дозовый диапазон для IV степени тяжести ОЛБ, а также, используя разработанные методы оценки дозовых порогов с учетом их неопределенностей, найти более точный дозовый порог по смертности при остром внешнем облучении, приблизительная оценка которого составляет 6–8 Гр [12]. Такую по порядку величину дозового порога по смертности подтверждает и тот факт, что согласно 118 Публикации МКРЗ [10], после полученной дозы острого облучения 6 Гр к костномозговому синдрому ОЛБ присоединятся и кишечный синдром. К сожалению, доступные литературные источники, посвященные изучению степени тяжести костномозговой формы ОЛБ при внешнем аварийном облучении, немногочисленны. Интересным примером публикации в данном направлении является работа, выполненная сотрудниками Института радиобиологии вооруженных сил Германии на основе базы данных SEARCH (153 случая ОЛБ) [26], в которой была выявлена корреляционная связь между степенью тяжести ОЛБ и дозой внешнего облучения, полученной методом биологической дозиметрии, и предпринята попытка построения новых дозовых интервалов для степеней тяжести ОЛБ. Можно также указать и на недавний литературный обзор [27], посвященный биологическим маркерам ОЛБ, которые, вероятнее всего, также будут полезны для более точной идентификации степени тяжести ОЛБ.

**Выводы.** Таким образом, в настоящем исследовании методами математического моделирования и статистического анализа данных получены новые результаты по оценке ОР и дозовых порогов с неопределенностями для ОЛБ различных степеней тяжести, развившейся после внешнего облучения в ре-

зультате аварии на ЧАЭС (104 человека). Конкретные результаты расчетов представлены в работе попарно в соответствии с группами степени тяжести ОЛБ: группы I–II ( $D_0 = 1,95$  Гр;  $U = 9,38$  %;  $OP = 3,05$ ), группы II–III ( $D_0 = 3,96$  Гр;  $U = 4,63$  %;  $OP = 5,93$ ), группы III–IV ( $D_0 = 6,13$  Гр;  $U = 6,81$  %;  $OP = 8,82$ ).

Показано, что полученные результаты расчетов дозовых порогов и их неопределенностей позволяют уточнить диагнозы и степень тяжести ОЛБ у 18 человек в исследуемой субкогорте пострадавших от Чернобыльской аварии. Расчеты относительного риска для степени тяжести ОЛБ в совокупности с оценками дозовых порогов, помимо количественного описания «тонкой структуры» ОЛБ, как показал

анализ имеющихся литературных данных, будут полезны для уточнения дозового диапазона IV степени тяжести ОЛБ и выявления взаимосвязи степеней тяжести с таким интегральным показателем, как снижение продолжительности жизни после острого аварийного облучения.

**Финансирование.** Исследование выполнено в рамках Государственного контракта № 11.315.24.2 от 14 июня 2024 г. «Совершенствование медико-санитарного обеспечения аварийного реагирования при чрезвычайных радиационных ситуациях и радиационных авариях».

**Конфликт интересов.** Автор данной статьи сообщает об отсутствии конфликта интересов.

### Список литературы

1. A Review of Criticality Accidents / T.P. McLaughlin, S.P. Monahan, N.L. Pruvost, V.V. Frolov, B.G. Ryazanov, V.I. Sviridov. – Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 2000. – 144 p.
2. Kruglov A. The History of the Soviet Atomic Industry. – London: CRC Press, 2002. – 288 p.
3. Acute radiation exposure and early hematopoietic response pattern: an evaluation of the Chernobyl accident victims / I. Friesecke, K. Beyer, D. Densow, T.M. Flidner, D. Belyi, O. Gergel, A. Kowalenko, V. Bebesheko, A. Baranov // *Int. J. Radiat. Med.* – 1999. – № 1. – P. 55–62.
4. Иванов В.К., Цыб А.Ф. Медицинские и радиобиологические последствия Чернобыля для населения России: оценка радиационных рисков. – М.: Медицина, 2002. – 392 с.
5. Polonium-210 as a poison / J. Harrison, R. Leggett, D. Lloyd, A. Phipps, B. Scott // *J. Radiol. Prot.* – 2007. – Vol. 27, № 1. – P. 17–40. DOI: 10.1088/0952-4746/27/1/001
6. Scott B.R. Health risk evaluation for ingestions exposure of humans to polonium-210 // *Dose Response.* – 2007. – Vol. 5, № 2. – P. 94–122. DOI: 10.2203/dose-response.06-013.Scott
7. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2013 Report Volume I. – New York: UNSCEAR, 2014. – 311 p.
8. Радиационная медицина: в 4 т. / под общ. ред. акад. РАМН Л.А. Ильина. – М.: ИздАТ, 2001. – Т. 2. Радиационные поражения человека. – 432 с.
9. Лушников Е.Ф., Абрисомов А.Ю. Современная лучевая патология человека: проблемы методологии исследований, этиологии, патогенеза и классификации. – Обнинск: ФГБУ МРНЦ Минздравсоцразвития России, 2012. – 236 с.
10. Публикация 118 МКРЗ. Отчет МКРЗ по тканевым реакциям, ранним и отдаленным эффектам в нормальных тканях и органах – пороговые дозы в контексте радиационной защиты / Ф.А. Стюарт, А.В. Аклеев, М. Хауэр-Дженсен, Д.Х. Хендри, Н.Д. Клеймен, Т.Д. Маквитти, Б.М. Эйлмен, А.Б. Эдгар [и др.]; под ред. А.В. Аклеева, М.Ф. Киселева; пер. с англ. Е.М. Жидковой, Н.С. Котовой. – Челябинск: Книга, 2012. – 384 с.
11. Осовец С.В., Азизова Т.В., Гергенрейдер С.Н. Методы оценки и расчета дозовых порогов для детерминированных эффектов // *Медицинская радиология и радиационная безопасность.* – 2009. – Т. 54, № 2. – С. 25–31.
12. Assessment of risks and dose thresholds for some effects of acute exposure / S.V. Osovetovs, T.V. Azizova, R.D. Day, N. Wald, M.V. Druzhinina // *Health Phys.* – 2011. – Vol. 100, № 2. – P. 176–184. DOI: 10.1097/HP.0b013e3181ebd123
13. Осовец С.В., Азизова Т.В., Гергенрейдер С.Н. Методы оценки неопределенности дозовых порогов для детерминированных эффектов // *Медицинская радиология и радиационная безопасность.* – 2010. – Т. 55, № 3. – С. 11–16.
14. IAEA. Follow-up of delayed health consequences of acute accidental radiation exposure. Lessons to be learned from their medical management [Электронный ресурс]. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2002. – 138 p. – URL: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te\\_1300\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1300_web.pdf) (дата обращения: 09.09.2025).
15. Mettler F.A. Jr, Gus'kova A.K., Gusev I. Health effects in those with acute radiation sickness from the Chernobyl accident // *Health Phys.* – 2007. – Vol. 93, № 5. – P. 462–469. DOI: 10.1097/01.HP.0000278843.27969.74
16. Гуськова А.К. Медицинские последствия аварии на Чернобыльской АЭС. Основные итоги и нерешенные проблемы // *Атомная энергия.* – 2012. – Т. 113, вып. 2. – С. 109–116.
17. Медицинские последствия аварии на Чернобыльской АЭС / И.А. Галстян, Н.М. Надежина, Л.А. Суворова, О.Г. Каширина, В.Ю. Нугис // *Саратовский научно-медицинский журнал.* – 2015. – Т. 11, № 4. – С. 637–644.
18. Samoylov A.S., Bushmanov A.Yu., Galstyan I.A. Medical management: major lessons learned from the Chernobyl accident (the review) // *J. Radiol. Prot.* – 2021. – Vol. 41, № 3. DOI: 10.1088/1361-6498/ac14d4
19. Острая лучевая болезнь человека: атлас-монография. Часть I. Пострадавшие при радиационной аварии на ЧАЭС 1986 г. / под ред. А.С. Самойлова, В.Ю. Соловьева. – М.: ФГБУ ГНЦ им. Бурназяна ФМБА России, 2016. – 140 с.
20. Исследование прогностической ценности гематологических критериев оценки степени тяжести лучевого поражения [Электронный ресурс] / В.Ю. Соловьев, В.Ю. Нугис, Т.М. Хамидулин, В.И. Краснюк // *Медлайн.ру: медико-биологический информационный портал для специалистов.* – 2011. – Т. 12, ст. 35. – С. 420–430. – URL: <http://www.medline.ru/public/art/tom12/art35.html> (дата обращения: 09.09.2025).
21. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ) / пер с англ.; под общ. ред. М.Ф. Киселёва, Н.К. Шандалы. – М.: Изд.-во ООО ПКФ «Алана», 2009. – 344 с.
22. Fry R.J. Deterministic effects // *Health Phys.* – 2001. – Vol. 80, № 4. – P. 338–343. DOI: 10.1097/00004032-200104000-00009
23. Рекомендации по диагностике и лечению костномозговой формы острой лучевой болезни / А.С. Самойлов, М.В. Кончаловский, А.Ю. Бушманов, И.А. Галстян, В.Ю. Нугис, А.А. Давтян, Л.Р. Колганова, Н.А. Метляева, Ф.С. Тобурбаров // *Гематология и трансфузиология.* – 2023. – Т. 68, № 1. – С. 98–128. DOI: 10.35754/0234-5730-2023-68-1-98-128

24. Продолжительность жизни у работников ПО «Маяк» после острой лучевой болезни разной степени тяжести / В.И. Тельнов, Т.В. Азизова, М.Б. Мосеева, М.В. Банникова // Радиационная гигиена. – 2023. – Т. 16, № 1. – С. 80–90. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-80-90

25. IAEA. Safety Reports Series No 101. Medical management of radiation injures. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2020. – 112 p.

26. Correlation of radiation dose estimates by DIC with the METREPOL hematological classes of disease severity / M. Port, B. Pieper, H.D. Dorr, A. Hubsch, M. Majewski, M. Abend // Radiat. Res. – 2018. – Vol. 189, № 5. – P. 449–455. DOI: 10.1667/RR14936.1

27. Singh V.K., Santiago P., Simas M., Garcia M., Fatanni O., Wise S.Y., Seed T. Acute radiation syndrome: an update on biomarkers for radiation injury // Journal of Radiation and Cancer Research. – 2018. – Vol. 9, № 4. – P. 132–146. DOI: 10.4103/jrcr.jrcr\_26\_18

Осовец С.В. Относительный риск и дозовые пороги с учетом их неопределенности для острой лучевой болезни различной степени тяжести // Анализ риска здоровью. – 2026. – № 1. – С. 106–114. DOI: 10.21668/health.risk/2026.1.10

UDC 613.6.027

DOI: 10.21668/health.risk/2026.1.10.eng



Research article

## RELATIVE RISK AND DOSE THRESHOLDS WITH THEIR UNCERTAINTIES FOR DIFFERENT SEVERITY DEGREES OF ACUTE RADIATION SYNDROME

S.V. Osovets

Southern Urals Federal Scientific Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency, 19 Ozyorskoe shosse, Ozyorsk, 456780, Russian Federation

*The aim of this study was to assess dose thresholds and their uncertainties for different severity degrees of acute radiation syndrome (ARS) and to establish relative risk (RR) of transition from preceding ARS severity degree to a higher one.*

*The study objects were represented by 104 individuals with ARS developed after Chernobyl disaster at the Chernobyl nuclear power plant in 1986 with literature available data on ARS severity degree and verified external  $\gamma$ - $\beta$ -radiation doses.*

*Empirical dose distributions in each group of ARS severity degree were approximated by the distribution function based on Weibull model; dose thresholds ( $D_0$ ) and their uncertainties ( $U$ , %) were calculated by pairwise examination of distribution functions for the study groups; RR of transition from preceding ARS severity degree to a higher one were calculated by using fourfold tables. The calculation results were presented in the paper in pairs in accordance with the ARS severity degrees: Groups I–II ( $D_0 = 1.95$  Gy;  $U = 9.38$  %;  $RR = 3.05$ ), Groups II–III ( $D_0 = 3.96$  Gy;  $U = 4.63$  %;  $RR = 5.93$ ), Groups III–IV ( $D_0 = 6.13$  Gy;  $U = 6.81$  %;  $RR = 8.82$ ).*

*The study findings have not only scientific but also practical significance as they make it possible to predict ARS severity degrees more accurately if data are available on external radiation exposure doses after a radiation accident. It is also proposed to correct the regulated dose range for IV severity degree of bone marrow ARS syndrome based on these findings.*

**Keywords:** acute radiation syndrome, severity degree, dose threshold, uncertainty, relative risk, radiation accident, Chernobyl nuclear power station, modeling.

### References

1. McLaughlin T.P., Monahan S.P., Pruvost N.L., Frolov V.V., Ryazanov B.G., Sviridov V.I. A Review of Criticality Accidents. Los Alamos, Los Alamos National Laboratory Publ., 2000, 144 p.
2. Kruglov A. The History of the Soviet Atomic Industry. London, CRC Press, 2002, 288 p.
3. Friesecke I., Beyer K., Densow D., Flidner T.M., Belyi D., Gergel O., Kowalenko A., Bebesko V., Baranov A. Acute radiation exposure and early hematopoietic response pattern: an evaluation of the Chernobyl accident victims. *Int. J. Radiat. Med.*, 1999, no. 1, pp. 55–62.

© Osovets S.V., 2026

Sergey V. Osovets – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher (e-mail: clinic@subi.su; tel.: + 7 (351) 302-93-95; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6180-2061>).

4. Ivanov V.K., Tsyb A.F. Meditsinskie i radiobiologicheskie posledstviya Chernobylya dlya naseleniya Rossii: otsenka radiatsionnykh riskov [Medical and radiobiological consequences of the Chernobyl for Russia's population: radiation risk estimates]. Moscow, Meditsina, 2002, 392 p. (in Russian).
5. Harrison J., Leggett R., Lloyd D., Phipps A., Scott B. Polonium-210 as a poison. *J. Radiol. Prot.*, 2007, vol. 27, no. 1, pp. 17–40. DOI: 10.1088/0952-4746/27/1/001
6. Scott B.R. Health risk evaluation for ingestions exposure of humans to polonium-210. *Dose Response*, 2007, vol. 5, no. 2, pp. 94–122. DOI: 10.2203/dose-response.06-013.Scott
7. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2013 Report Volume I. New York, UNSCEAR, 2014, 311 p.
8. Radiatsionnaya meditsina [Radiation medicine]: in 4 volumes. In: L.A. Il'in ed. Moscow, IzdAT, 2001, vol. 2. Radiatsionnye porazheniya cheloveka [Radiation injuries in humans], 432 p. (in Russian).
9. Lushnikov E.F., Abrosimov A.Yu. Sovremennaya luchelevaya patologiya cheloveka: problemy metodologii issledovaniya, etiologii, patogenezisa i klassifikatsii [Present-day radiation pathology in humans: problems of study methodology, etiology, pathogenesis and classification]. Obninsk, FGBU MRNTs Minzdravstvosrazvitiya Rossii Publ., 2012, 236 p. (in Russian).
10. Stewart F.A., Akleyev A.V., Hauer-Jensen M., Hendry J.H., Kleiman N.J., MacVittie T.J., Aleman B.M., Edgar A.B. [et al.]. ICRP PUBLICATION 118: ICRP Statement on Tissue Reactions and Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs – Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context. In: A.V. Akleev, M.F. Kiselev eds.; E.M. Zhidkova, N.S. Kotova translation from English. Chelyabinsk, Kniga, 2012, 384 p. (in Russian).
11. Osovets S.V., Azizova T.V., Gergenreyder S.N. Methods of estimation of dose thresholds for deterministic effects. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost'*, 2009, vol. 54, no. 2, pp. 25–31 (in Russian).
12. Osovets S.V., Azizova T.V., Day R.D., Wald N., Druzhinina M.B. Assessment of risk and dose thresholds for some effects of acute exposure. *Health Phys.*, 2011, vol. 100, no. 2, pp. 176–184. DOI: 10.1097/HP.0b013e3181ebd123
13. Osovets S.V., Azizova T.V., Gergenreider S.N. Methods of Uncertainty Assessment for Deterministic Effects Dose Thresholds. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost'*, 2010, vol. 55, no. 3, pp. 11–16 (in Russian).
14. IAEA. Follow-up of delayed health consequences of acute accidental radiation exposure. Lessons to be learned from their medical management. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2002, 138 p. Available at: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te\\_1300\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1300_web.pdf) (September 09, 2025).
15. Mettler F.A. Jr, Gus'kova A.K., Gusev I. Health effects in those with acute radiation sickness from the Chernobyl accident. *Health Phys.*, 2007, vol. 93, no. 5, pp. 462–469. DOI: 10.1097/01.HP.0000278843.27969.74
16. Gus'kova A.K. Meditsinskie posledstviya avarii na Chernobyl'skoi AES. Osnovnye itogi i nereshennye problemy [Health consequences of the Chernobyl nuclear power plant accident: Key findings and unresolved issues]. *Atomnaya energiya*, 2012, vol. 113, iss. 2, pp. 109–116 (in Russian).
17. Galstyan I.A., Nadejina N.M., Suvorova L.A., Kashirina O.G., Nugis V.Ju. Medical consequences of Chernobyl accident. *Saratovskii nauchno-meditsinskii zhurnal*, 2015, vol. 11, no. 4, pp. 637–644 (in Russian).
18. Samoylov A.S., Bushmanov A.Yu., Galstyan I.A. Medical management: major lessons learned from the Chernobyl accident (the review). *J. Radiol. Prot.*, 2021, vol. 41, no. 3. DOI: 10.1088/1361-6498/ac14d4
19. Ostraya luchelevaya bolezn' cheloveka: atlas-monografiya. Chast' I. Postradavshie pri radiatsionnoi avarii na ChAES 1986 g. [Acute radiation syndrome in humans. Atlas. Volume I. Victims of the radiation accident at the ChNPP in 1986]. In: A.S. Samoilova, V.Yu. Solov'eva eds. Moscow, FGBU GNTs im. Burnazyana FMBA Rossii Publ., 2016, 140 p. (in Russian).
20. Soloviev V.Yu., Nugis V.Yu., Khamidulin T.M., Krasnjuk V.I. Research of haematological criteria's prognostic value in radiation injuries severity assessment. *Medline.ru*, 2011, vol. 12, art. 35, pp. 420–430. Available at: <http://www.medline.ru/public/art/tom12/art35.html> (September 09, 2025) (in Russian).
21. ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. In: translation from English; M.F. Kiselev, N.K. Shandala eds. Moscow, OOO PKF «Alana» Publ., 2009, 344 p. (in Russian).
22. Fry R.J. Deterministic effects. *Health Phys.*, 2001, vol. 80, no. 4, pp. 338–343. DOI: 10.1097/00004032-200104000-00009
23. Samoylov A.S., Konchalovsky M.V., Bushmanov A.Yu., Galstyan I.A., Nugis V.Yu., Davtyan A.A., Kolganova L.R., Metlyaeva N.A., Torubarov F.S. Recommendations for the diagnosis and treatment of bone marrow form of acute radiation syndrome. *Gematologiya i transfuziologiya*, 2023, vol. 68, no. 1, pp. 98–128. DOI: 10.35754/0234-5730-2023-68-1-98-128 (in Russian).
24. Telnov V.I., Azizova T.V., Moseeva M.B., Bannikova M.V. Lifetime of Mayak workers after acute radiation syndrome of various severity levels. *Radiatsionnaya gigiyena*, 2023, vol. 16, no. 1, pp. 80–90. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-80-90 (in Russian).
25. IAEA. Safety Reports Series No 101. Medical management of radiation injures. Vienna, International Atomic Energy Agency Publ., 2020, 112 p.
26. Port M., Pieper B., Dorr H.D., Hubsch A., Majewski M., Abend M. Correlation of radiation dose estimates by DIC with the METREPOL hematological classes of disease severity. *Radiat. Res.*, 2018, vol. 189, no. 5, pp. 449–455. DOI: 10.1667/RR14936.1
27. Singh V.K., Santiago P., Simas M., Garcia M., Fatanmi O., Wise S.Y., Seed T. Acute radiation syndrome: an update on biomarkers for radiation injury. *Journal of Radiation and Cancer Research*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 132–146. DOI: 10.4103/jrcr.jrcr\_26\_18

*Osovets S.V. Relative risk and dose thresholds with their uncertainties for different severity degrees of acute radiation syndrome. Health Risk Analysis*, 2026, no. 1, pp. 106–114. DOI: 10.21668/health.risk/2026.1.10.eng

Получена: 21.10.2025

Одобрена: 02.02.2026

Принята к публикации: 26.03.2026