

ИЗУЧЕНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ РАДИАЦИОННЫХ АВАРИЙ

УДК 314.484:616-001.2:539.1.047:[331.435 + 621.039]

АНАЛИЗ ДОЖИТИЯ И ПОТЕРЬ ЖИЗНЕННОГО ПОТЕНЦИАЛА У РАБОТНИКОВ ПОСЛЕ ОСТРОЙ ЛУЧЕВОЙ БОЛЕЗНИ АВАРИЙНОГО ГЕНЕЗА

© 2024 г. В. И. Тельнов*, Т. В. Азизова, М. Б. Мосеева, М. В. Банникова

Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озёрск, Россия

*E-mail: clinic@subi.su

Поступила в редакцию 30.10.2023 г.

После доработки 22.03.24 г.

Принята к публикации 11.09.2024 г.

Оценка влияния радиационного воздействия на потенциальные показатели продолжительности жизни человека — актуальная проблема радиационной медицины. Цель исследования — анализ показателей дожития и потерь жизненного потенциала у работников ПО “Маяк” после острой лучевой болезни в результате радиационных аварий и участников аварий без заболевания. Анализ проведен у 64 работников ПО “Маяк” (54 мужчины и 10 женщин) с помощью программы STATISTICA 10. Изучены показатели дожития до и после основного заболевания, явившегося причиной смерти, доли лиц, не доживших до 40, 60, 80 и 80+ лет, а также общие, частичные и единичные (средневзвешенные) потери жизненного потенциала и индекс потерь жизненного потенциала. В результате исследования у работников с тяжелой и особенно крайне тяжелой степенью тяжести болезни относительно работников средней и легкой степени тяжести заболевания и участников аварий установлено статистически значимое ухудшение показателей дожития и повышение показателей потерь жизненного потенциала. Причиной ухудшения исследованных показателей при крайне тяжелой степени заболевания было его экстремальное течение. При тяжелой степени тяжести сокращение продолжительности жизни было обусловлено, главным образом, преждевременной смертностью от злокачественных новообразований и острой лучевой болезни. Установлена линейная регрессионная зависимость показателей дожития и потерь жизненного потенциала на 1 Lp дозы облучения. Относительный риск снижения показателей дожития и повышение показателей потерь жизненного потенциала у работников с тяжелой и крайне тяжелой степенью тяжести заболевания и при более высоких дозах острого облучения (более 5 или 10 Гр) по сравнению с остальными работниками, был существенно повышен (от 3.64 до 52.0; $p < 0.05-0.001$).

Ключевые слова: работники ПО “Маяк”, радиационные аварии, острое внешнее облучение, острая лучевая болезнь, показатели дожития, потери жизненного потенциала, причины смерти, регрессия, относительный риск

DOI: 10.31857/S0869803124060062, **EDN:** NDGBNL

Одной из актуальных проблем радиационной медицины является оценка влияния радиационного воздействия на продолжительность жизни (ПЖ) человека. ПЖ — одна из важнейших характеристик уровня и качества жизни, интегральный показатель здоровья населения, отражающий влияние на человека множества самых разнообразных факторов, в том числе радиационных. Сокращение ПЖ является универсальным эффектом внешнего и внутреннего облучения у животных [1, 2]. В более поздние сроки изучения проблемы были получены достоверные данные о сокращении ПЖ после внешнего облучения у американских и британских радио-

логов, у японцев, подвергшихся атомной бомбардировке [3–5]. При внутреннем облучении сокращение ПЖ установлено при воздействии радия [6–8] и плутония [9–11]. Однако до настоящего времени остается малоизученной проблема ПЖ у людей после острой лучевой болезни (ОЛБ). Трудности в изучении ПЖ при ОЛБ, как отмечалось ранее [12], связаны с небольшими по численности группами, недостаточно полными или отсутствующими медицинскими данными, а также с необходимостью практически полной убыли лиц для максимально возможной численности при анализе, т.е. повышения статистической мощности исследования.

На современном этапе изучения ПЖ необходим не только анализ статичных показателей, фиксирующих число прожитых лет, но и потенциальных показателей, отражающих различные аспекты дожития и потерь жизненного потенциала (ПЖП): life potential lost (LPL). Как известно, жизненный потенциал – ЖП (life potential – LP) является центральным понятием и основным обобщающим показателем в потенциальной демографии [13]. ЖП – число предстоящих лет жизни лица или группы лиц в определенном возрасте, рассчитанное при условии сохранения данного уровня по возрастной смертности на основе таблиц смертности [14]. Выделяют полный, частичный и единичный (средний) ЖП, которые измеряются числом человеко-лет, а также индекс жизненного баланса, как отношение ЖП к числу прожитых человеко-лет [13, 15–17]. Данные показатели изучаются, как правило, у проживающего населения. Применение методов потенциальной демографии дает возможность повысить точность сопоставления различных демографических процессов, выражая их объем в человеко-годах, что является адекватным измерителем длящегося, а не статичного проживания народонаселения [17]. Важным показателем, характеризующим сокращение продолжительности жизни, являются ПЖП, известные также как потерянные годы потенциальной жизни (ПГПЖ – Potential years of life lost – PYLL) – [18, 19]. Показатели ПЖП изучаются, как у проживающего, так и умершего населения. Для более объективной оценки ПЖП использовали показатели, соот-

ветствующие показателям ЖП, т.е. полные, частичные и единичные [20].

Цель настоящего исследования – оценка показателей дожития и ПЖП у работников ПО “Маяк” из регистра ОЛБ на основе данных многолетнего наблюдения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Изучаемая группа работников

Исследование проведено в группе работников ПО “Маяк”, входящих в Регистр ОЛБ, содержащий на 31 декабря 2020 г. первичные данные на 77 человек, подвергшихся кратковременному облучению высокой мощности в 23 радиационных авариях на ПО “Маяк”, произошедших с 1950 по 1968 годы [21–23]. По состоянию на 31 декабря 2020 г. жизненный статус известен для 64 человек, из которых 58 (90,6%) умерли, а шесть (9,4%) живы и их средний возраст (\pm стандартное отклонение) составлял $84,5 \pm 5,96$ лет.

Численный и половой состав работников с известным жизненным статусом представлен в табл. 1.

Из этой таблицы следует, что соотношение мужчин и женщин в группах работников с разной степенью тяжести ОЛБ и участников аварий было довольно близким, за исключением ОЛБ тяжелой степени тяжести.

Таблица 1. Распределение работников в зависимости от степени тяжести ОЛБ (в скобках представлено число живых на 31 декабря 2020 г.)

Table 1. Distribution of workers by the acute radiation syndrome (ARS) level of severity (in the parentheses the number of alive workers at 31 December 2020 is presented)

Степень тяжести ОЛБ	Мужчины		Женщины		Все
	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>
Участники аварий	15 (1)	83.3	3 (1)	16.7	18 (2)
Легкая (I)	26 (3)	89.7	3 (1)	10.3	29 (4)
Средняя (II)	4	80.0	1	20.0	5
Тяжелая (III)	3	60.0	2	40.0	5
Крайне тяжелая (IV)	6	85.7	1	14.3	7
ОЛБ (I–IV)	39 (3)	84.8	7 (1)	15.2	46 (4)
Все	54 (4)	84.4	10 (2)	15.6	64 (6)

Степень тяжести ОЛБ у работников ПО “Маяк” имела тесную связь с поглощенной дозой острого внешнего облучения (ранговый коэффициент корреляции Спирмена составил 0.80; $p < 0,001$). Средние поглощенные дозы острого ионизирующего облучения у работников с ОЛБ разной степени тяжести и участников аварий представлены на рис. 1. Поглощенные дозы являются верифицированными оценками доз острого облучения, полученными расчетным путем на основании показаний индивидуальных пленочных дозиметров работников и территориальных дозиметров, регистрирующих гамма-излучение в различных точках рабочих помещений [24].

Причины смерти известны у всех умерших лиц с ОЛБ и участников аварий с известным жизненным статусом. Первое место в структуре причин смерти у мужчин занимают болезни системы кровообращения (БСК), второе — злокачественные новообразования (ЗНО), третье — внешние причины (ВП), в том числе ОЛБ, и в единственном случае — болезни органов пищеварения (БОП). У женщин причинами смерти в порядке убывания были ЗНО, БСК и ВП. Смерть от ОЛБ тяжелой и крайне тяжелой степени тяжести, как у мужчин, так и у женщин, была основной причиной среди всех внешних причин. На рис. 2 представлена структура причин смерти у работников с ОЛБ разной степени тяжести и участников аварий. При этом единственной причиной смерти у работников с ОЛБ крайне тяжелой степени тяжести явилось экстремальное острое радиаци-

онное воздействие в чрезмерных дозах. У работников с ОЛБ тяжелой степени тяжести основной причиной смерти были ЗНО, а при ОЛБ средней и легкой степени тяжести, а также у участников аварий — БСК. Прочие причины (ПП) были наименьшими.

ИССЛЕДОВАННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ

В настоящем исследовании изучали число прожитых лет до острого облучения, до и после диагностики основного заболевания, явившегося причиной смерти (полная информация была доступна для 41 работника), а также ПЖ от рождения. Потенциальный подход включал также оценку доли лиц, доживших до последовательных возрастных периодов жизни. Учитывая, что в когорте населения ожидаемая ПЖ, т.е. ЖП, всегда больше, чем в общей популяции на 10–15 лет [25], для оценки ПЖП использовали гендерные стандартные значения ЖП, полученные в когорте работников ПО “Маяк” 1948–1958 гг. найма после 18 лет, а именно: 77 человеко-лет у мужчин и 81 человеко-год у женщин [12]. Полные и частичные ПЖП, т.е. число лет, не дожитых до стандартного ЖП, соответственно при всех и основных причинах смерти определяли по формуле [15]:

$$\text{ПЖП, чел.-лет} = \sum_{k=1}^n (\text{ЖП}_{\text{СТ}k} - \text{ПЧГ}_k),$$

где $\text{ЖП}_{\text{СТ}}$ — гендерный стандарт ЖП при рождении; ПЧГ — прожитые человеко-годы.

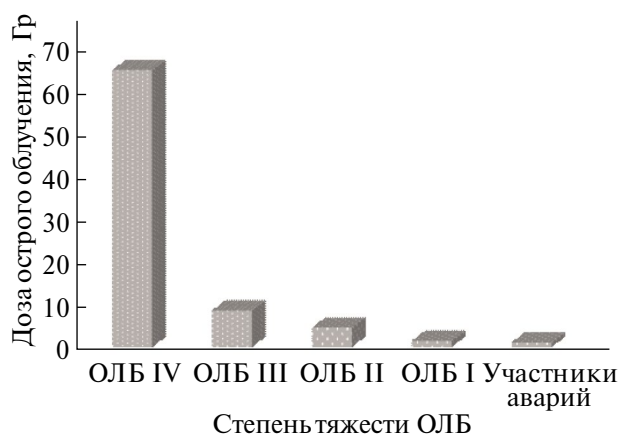


Рис. 1. Средние поглощенные дозы острого ионизирующего облучения у работников с ОЛБ разной степени тяжести и участников аварий.

Fig. 1. Average absorbed doses of acute radiation exposure in workers with ARS (various levels of severity) and in accident participants.

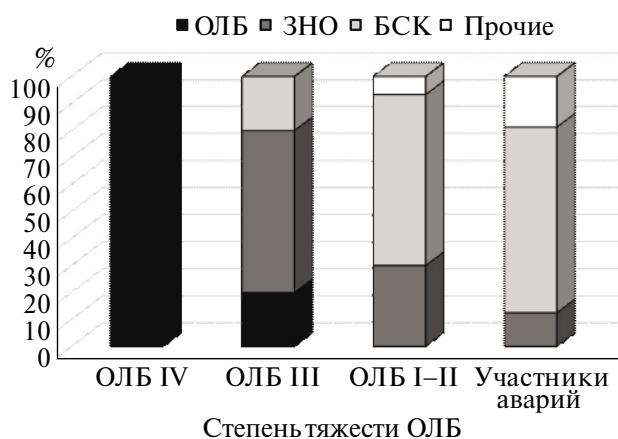


Рис. 2. Структура причин смерти у работников с ОЛБ разной степени тяжести и участников аварий (пояснения в тексте).

Fig 2. Causes of death (structure) in workers with ARS (various severity levels) and in radiation accident participants (the description is provided within the text).

Оценивали структуру ПЖП в % при ОЛБ разной степени тяжести и основных причинах смерти. Также при всех и основных причинах смерти определяли единичные ПЖП, рассчитанные как средневзвешенное значение на одного индивида (ЕПЖП), и индекс ПЖП как ПЖП на 1 год прожитой жизни. Изучали 12 показателей дожития и ПЖП (табл. 2).

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Статистический анализ проводился с помощью программы STATISTICA 10 и включал дескриптивный, ранговый корреляционный и регрессионный анализы, а также сравнение средних значений по критерию Стьюдента при нормальном распределении исследуемых показателей. При асимметричном распределении показателей использовали непараметрические методы сравнения средних по U-критерию Манна–Уитни в двух группах, по H критерию Краскела–Уоллиса при одновременном сравнении показателей в трех группах, для сравнения распределений – χ^2 в случае числа наблюдений не меньше 5 и по одностороннему точному критерию Фишера в случае числа наблюдений меньше 5 для сравнения частот. Проводили оценку относительного риска (ОР) ухудшения показателей дожития и потерь ПЖП с определением его 95%-ного доверительного интервала (95%-ный ДИ) на основе четырехпольных таблиц для групп с разными степенями тяжести ОЛБ и дозами острого внешнего облучения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Учитывая, что 90.6% членов регистра ОЛБ к настоящему времени умерли, в табл. 3 представлены результаты оценки периодов жизни до острого облучения, до и после диагностики основного заболевания и ПЖ от рождения.

Из табл. 3 видно, что прожитые годы до острого облучения не имели статистически значимой связи со степенью тяжести ОЛБ. Остальные показатели были статистически значимо ниже у работников с ОЛБ тяжелой (ОЛБ III) и, особенно, крайне тяжелой степени (ОЛБ IV), чем при ОЛБ средней (ОЛБ II) и легкой (ОЛБ I) степени тяжести и участников аварий, которые в целом составили группу сравнения (далее ОЛБ О-II). Следует отметить, что входящие в эту группу сравнения подгруппы не имели статистически значимых различий между собой по всем исследованным показателям.

При оценке дожития работников с ОЛБ разной степени тяжести, умерших в разных возрастных периодах жизни, установлено, что все работники с ОЛБ IV степени тяжести умерли до 40 лет (табл. 3). Среди работников с ОЛБ III степени тяжести 20% умерли до 40 лет, 40% – в 40–59 лет и остальные 40% – в 60–79 лет. Среди работников с ОЛБ О-II 1,9% умерли до 40 лет, 13.5% – в 40–59 лет, 55.8% – в 60–79 лет и остальные 28.8% – в 80+ лет. При этом умершие работни-

Таблица 2. Показатели дожития и потерь жизненного потенциала (ПЖП)
Table 2. Survival and life potential loss (LPL) indicators

Показатели дожития и потерь жизненного потенциала	Характеристика
Период жизни до острого внешнего облучения, лет	Прожитые годы от даты рождения до даты острого внешнего облучения
Период жизни до диагностики основного заболевания, лет	Прожитые годы от даты острого внешнего облучения до даты диагностики заболевания, явившегося причиной смерти
Период жизни после диагностики основного заболевания, лет	Прожитые годы от даты диагностики основного заболевания до даты смерти
Все периоды жизни	ПЖ от даты рождения до даты смерти
Доли лиц, умерших в разных возрастных периодах жизни, %	Доли лиц, умерших до 40, в 40–59, в 60–79 и в 80+ лет
Полные ПЖП, чел.-лет	Суммарные групповые или популяционные ПЖП
Частичные ПЖП, чел.-лет	Структурные ПЖП как составные части групповых или популяционных ПЖП
Единичные ПЖП, чел.-лет	Средневзвешенные ПЖП, рассчитанные на 1 индивида
Индекс ПЖП	Отношение ПЖП к числу прожитых человеко-лет на 1 индивида

Таблица 3. Периоды жизни по основному заболеванию и возрасту смерти у работников с ОЛБ разной степени тяжести**Table 3.** Periods of life by the main disease and age at death in workers with ARS

Степень тяжести ОЛБ	n	Периоды жизни по основному заболеванию, лет*			
		до острого облучения	от облучения до диагноза	после диагноза	все периоды
Все ОЛБ	30	29.5 ± 7.05	21.7 ± 18.90	7.5 ± 11.16	58.7 ± 20.69
ОЛБ О-II	29	29.8 ± 7.19	31.6 ± 16.17	11.7 ± 12.20	73.1 ± 10.74
ОЛБ III	5	32.6 ± 9.67	17.5 ± 13.08	6.0 ± 11.01	56.1 ± 16.66
ОЛБ IV	7	27.8 ± 3.80	0.01 ± 0.01 ^d	0.03 ± 0.03 ^b	27.84 ± 3.83 ^d
Все	41	29.7 ± 6.93	24.5 ± 18.76	9.1 ± 11.69	63.3 ± 20.36
Степень тяжести ОЛБ	n	Доли умерших в возрастных периодах жизни, %**			
		в 18–39 лет	в 40–59 лет	в 60–79 лет	в 80+ лет
Все ОЛБ***	46	17.4	17.4	47.8	17.4
ОЛБ О-II	52	1.9	13.5	55.8	28.8
ОЛБ III	5	20.0	40.0	40.0	0
ОЛБ IV	7	100.0 ^{a,b}	0	0 ^c	0
ОЛБ III-IV	12	66.7 ^c	16.7	16.6 ^a	0 ^c
Все	64	14.1	14.1	48.4	23.4
Население РФ	10 ⁵	7.2	19.0	48.0	25.8

Примечание. Отмечены статистически значимые различия: * в трех группах (ОЛБ О-II, ОЛБ III и ОЛБ IV) по *H*-критерию Краскела–Уоллиса; ** по точному критерию Фишера и в сравнении с нулевой частотой по Ван дер Вардену относительно ОЛБ О-II. Здесь и далее: а – ($p < 0.05$), b – ($p < 0.01$), c – ($p < 0.001$), d – ($p < 0.0001$); *** различия в распределении умерших работников с ОЛБ и населения РФ в одинаковых возрастных периодах и гендерном соотношении ($\chi^2 = 8.46$; $p < 0.05$).

ки с ОЛБ О-II по возрастному распределению не отличались от умерших в России при соответствующем гендерном соотношении [26]. Статистически значимые различия в распределении установлены между всеми работниками с ОЛБ и населением России. ПЖ после острого облучения у работников с ОЛБ IV степени тяжести колебалась от 5 до 37 сут, составляя в среднем 13.6 сут, а в одном случае ОЛБ III степени тяжести – 33 сут. Следует отметить, что у лиц, пострадавших в результате Чернобыльской аварии, ПЖ после облучения при ОЛБ IV степени тяжести колебалась от 16 до 91 сут, составляя в среднем 26,2 сут, а при ОЛБ III степени тяжести от 10 до 48 сут – в среднем 18,3 сут [27,28]. Среди лиц с ОЛБ IV степени тяжести в эти сроки умерли все пострадавшие, а среди лиц с ОЛБ III степени тяжести – 33.3%.

В табл. 4 представлена динамика соотношения трех показателей: период жизни до острого облучения, периоды жизни до и после диагностики основного заболевания, которые вместе составляют общую ПЖ на каждую дозовую градацию.

Из табл. 4 видно, что с увеличением дозы облучения период жизни до острого облучения не имеет статистически значимых различий, а периоды жизни до и после диагностики основного заболевания сокращаются, в результате чего сокращается общая ПЖ. При дозах больше 10 Гр 77.8% работников не дожили до 40 лет, а в целом при дозах более 5 Гр (5–10 и >10 Гр) – 53.3%. В группе с дозами облучения 5–10 Гр из шести работников до 40 лет умер один, а в остальных случаях смертность по выделенным периодам жизни не отличалась от работников с дозами облучения

Таблица 4. Периоды жизни по основному заболеванию и возрасту смерти у работников с разными дозами острого облучения

Table 4. Life periods by the main disease and age at death in workers acutely exposed at various radiation doses

Дозы острого облучения, Гр	n	Периоды жизни по основному заболеванию, лет *			
		до острого облучения	от облучения до диагноза	после диагноза	все периоды
<5.0	29	30.3 ± 7.38	30.9 ± 16.31	10.8 ± 12.39	72.0 ± 11.02
5.0–10.0	4	31.9 ± 7.18	21.8 ± 18.8	9.5 ± 11.03	63.2 ± 22.54
>10.0	8	26.7 ± 4.69	4.0 ± 11.21 ^c	2.8 ± 7.94 ^a	33.5 ± 16.44 ^c
Все	41	29.7 ± 6.93	24.5 ± 18.76	9.1 ± 11.69	63.3 ± 20.36
Дозы острого облучения, Гр	n	Доли умерших в возрастных периодах жизни, % **			
		в 18–39 лет	в 40–59 лет	в 60–79 лет	в 80+ лет
<5.0	49	2.0	16.3	55.1	26.6
5.0–10.0	6	16.7	0	50.0	33.3
>10.0	9	77.8 ^d	11.1	11.1 ^a	0
>5.0***	15	53.3 ^d	6.7	26.7 ^a	13.3
Все	64	14.1	14.1	48.4	23.4

Примечание. Отмечены статистически значимые различия: * между тремя группами с дозами облучения <5. 5–10 и 10 Гр по *H*-критерию Краскела–Уоллиса; ** по точному критерию Фишера относительно группы с дозами <5 Гр; а – (*p* < 0.05). с – (*p* < 0.001). d – (*p* < 0.0001); *** различия в распределении умерших работников с дозами <5 и >5 Гр ($\chi^2 = 25.02$; *p* < 0.0001).

менее 5 Гр. Последняя группа по распределению умерших в разных возрастных периодах статистически значимо не отличалась от населения РФ, представленном в табл. 3. Напротив, группа работников с дозами облучения более 5 Гр, как видно из табл. 4, имела существенные статистически значимые различия с предшествующей группой.

Полные ПЖП у всех обследованных работников составили 848 человеко-лет, в том числе 734 – во всех случаях ОЛБ. Частичные ПЖП у работников с ОЛБ III и IV были больше (459 человеко-лет), чем при ОЛБ О-II (388 человеко-лет) (табл. 5).

Количество и доли частичных ПЖП уменьшались в порядке ОЛБ IV > ОЛБ О-II > ОЛБ III. Единичные ПЖП уменьшались в другом порядке: ОЛБ IV > ОЛБ III > ОЛБ О-II. Индексы ПЖП изменялись в том же порядке, однако, их соотношения в сравниваемых группах были больше соотношений единичных ПЖП. При этом данные показатели у работников с ОЛБ III и IV степени тяжести были статистически значимо выше, чем у работников с ОЛБ О-II.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что более высокие значения и доли частичных ПЖП у работников с ОЛБ III и IV степени тяжести обусловлены не их распространенностью у всех обследованных (20,7%), а более высокими единичными ПЖП на фоне сравнительно низкой распространенности (эффект высоких единичных ПЖП). У работников с ОЛБ О-II степени тяжести частичные ПЖП были обусловлены прежде всего их более высокой распространенностью (79,3%) на фоне сравнительно низких значений единичных ПЖП (эффект распространенных единичных ПЖП). Помимо этих эффектов при внешних причинах смерти у населения отмечен совместный эффект высоких и распространенных единичных ПЖП [20].

В результате анализа структуры причин смерти, как следует из табл. 6, установлено, что при ОЛБ III-IV степени тяжести ведущей причиной смерти являлось данное радиационное поражение, затем ЗНО и БСК. У работников с ОЛБ О-II степени тяжести структура причин смерти приближалась к общепопуляционным значениям [26]. При этом ПЖ от рождения умер-

Таблица 5. Показатели потерь жизненного потенциала у работников с острой лучевой болезнью разной степени тяжести и при различных дозах облучения**Table 5.** Life potential loss indicators in workers with acute radiation sickness exposed at various radiation doses

Группы	n	%	Полные* и частичные ПЖП, чел.-лет		Единичные ПЖП, чел.-лет	Индекс ПЖП
			абс.	%		
Степень тяжести ОЛБ						
ОЛБ О–II	52	81.3	388	45.8	7.5 ± 9.48	0,13 ± 0,21
ОЛБ III	5	7.8	111	13.1	22.1 ± 13.31	0,49 ± 0,47
ОЛБ IV	7	10.9	349	41.2	49.8 ± 4.48 ^e	1,84 ± 0,37 ^e
Дозы острого облучения, Гр						
<5.0	49	76.6	444	52.4	8.9 ± 10.76	0,17 ± 0,26
5.0–10.0	6	9.4	67	7.9	11.1 ± 17.09	0,28 ± 0,52
>10.0	9	14.0	337	39.7	42.2 ± 17.20 ^d	1,52 ± 0,82 ^d
Все обследованные						
Все	64	100.0	848*	100.0	13.2 ± 16.37	0,35 ± 0,59

Примечание. Отмечены статистически значимые различия между тремя группами: ОЛБ О–II, ОЛБ III и ОЛБ IV и дозовыми группами <5, 5–10 и >10 Гр по *H*-критерию Краскела–Уоллиса; d – ($p < 0.0001$); e – ($p < 0.00001$)

ших от ЗНО работников с ОЛБ III степени тяжести была статистически значимо меньше, чем в группе работников с ОЛБ О–II степенями тяжести, умерших от ЗНО: $58,6 \pm 1,83$ лет против $68,3 \pm 9,52$ лет соответственно ($t = 3,29$; $p < 0,01$). В результате этого единичные ПЖП при ЗНО у работников с ОЛБ III степени тяжести были статистически значимо выше, чем при ЗНО в группе работников с ОЛБ О–II степени тяжести. При сравнительном анализе в дозовых группах работников были отмечены подобные, но менее выраженные статистически значимые различия (табл. 6).

Для оценки связи радиационных факторов и показателей дожития и ПЖП были определены ранговые коэффициенты корреляции Спирмена (R). Наибольшую отрицательную и положительную корреляцию с исследованными показателями имела степень тяжести ОЛБ (R от -0.46 до -0.54 и $R = 0.50$) по сравнению с дозой острого облучения (R от -0.30 до -0.48 и $R = 0.33$) соответственно (табл. 7).

Последнее, очевидно, связано, во-первых, с меньшей вариацией степени тяжести ОЛБ

по сравнению с вариацией дозы острого облучения (коэффициенты вариации 100.2 и 263.1 соответственно) и, во-вторых, с неодинаковой выраженностью клинических проявлений, то есть с разной радиорезистентностью у отдельных индивидов при близких дозах облучения [29]. Мощность дозы острого облучения и дозы хронического облучения не имели статистически значимой корреляционной связи ни с одним из исследованных показателей. Исходя из данных табл. 7, был проведен линейный регрессионный анализ зависимости пяти показателей от натурального логарифма (\ln) дозы острого внешнего облучения. В результате были получены статистически значимые линейные уравнения регрессии, свидетельствующие о высокой регрессионной зависимости данных показателей от дозы внешнего облучения (табл. 8).

Показано, что на 1 \ln дозы облучения: период жизни от облучения до диагностики основного заболевания уменьшается на 8.2 лет, период жизни после облучения – на 8.4 лет, продолжительность жизни от рождения – на 9 лет, а единичные ПЖП и индекс ПЖП увеличиваются на 8.5 человеко-лет и 0.35 соответственно.

Таблица 6. Показатели потерь жизненного потенциала у работников с острой лучевой болезнью разной степени тяжести при различных причинах смерти

Table 6. Life potential loss indicators in workers with acute radiation sickness who died of various causes

Причины смерти	Структура причин смерти		Полные* и частичные ПЖП, чел.-лет		Единичные ПЖП, чел.-лет	Индекс ПЖП
	<i>n</i>	%	абс.	%		
ОЛБ О-II						
ЗНО	11	19.0	111.1	13.6	10.1 ± 9.01	0.17 ± 0.16
БСК	30	51.7	191.6	23.4	6.4 ± 7.80	0.11 ± 0.14
Прочие	5	8.6	55.5	6.8	11.1 ± 11.18	0.20 ± 0.22
Все причины	46	79.3	358.2	43.8	7.5 ± 9.48	0.13 ± 0.21
ОЛБ III-IV						
ОЛБ	8	13.8	392.2	48.0	49.0 ± 4.68	1.77 ± 0.39
ЗНО	3	5.2	59.2	7.2	19.7 ± 3.37 ^a	0.34 ± 0.06 ^a
БСК	1	1.7	7.8	1.0	7.8	0.11
Все причины	12	20.7	459.2	56.2	38.3 ± 16.68 ^с	1.27 ± 0.80 ^с
Дозы облучения менее 5 Гр						
ЗНО	12	20.7	130.2	15.9	10.9 ± 9.03	0.18 ± 0.16
БСК	27	46.6	185.2	22.7	6.9 ± 8.07	0.11 ± 0.15
Прочие	5	8.6	55.5	6.8	11.1 ± 11.18	0.20 ± 0.22
Все причины	44	75.9	370.9	45.4	9.1 ± 9.86	0.16 ± 0.22
Дозы облучения более 5 Гр						
ОЛБ	8	13.8	392.2	48.0	49.0 ± 4.7	1.77 ± 0.39
ЗНО	2	3.4	39.3	4.8	19.8 ± 4.77 ^{**}	0.33 ± 0.09 ^{**}
БСК	4	6.9	15.3	1.8	3.8 ± 3.37	0.05 ± 0.05
Все причины	14	24.1	445.8	54.6	31.8 ± 20.60 ^с	1.07 ± 0.89 ^b
Все группы						
Все причины	58	100.0	817.4*	100.0	13.2 ± 16.37	0.35 ± 0.59

Примечание. Отмечены статистически значимые различия относительно группы с ОЛБ О-II по всем причинам смерти по *U*-критерию Манна-Уитни и умерших от ЗНО по *t*-критерию: ^{**} *p* < 0.1; ^a – *p* < 0.05; ^b – *p* < 0.01; ^c – *p* < 0.001; ^e – *p* < 0.00001.

Статистически значимая корреляционная связь и регрессионная зависимость от радиационных факторов исследованных показателей является отражением разных сторон единого процесса сокращения ПЖ, обусловленного радиационным воздействием, проявляющегося в меньшем дожитии до периодов жизни по забо-

леваемости и возрасту, а также повышением показателей ПЖП, которые в целом характеризуют снижение ЖП индивида.

При оценке ОР за референтный ОР, равный 1, принимали риск в группах с ОЛБ О-II степени тяжести, а также с дозами острого внешнего

Таблица 7. Ранговые коэффициенты корреляции Спирмена радиационных факторов и показателей дожития и потерь жизненного потенциала**Table 7.** Spearman's correlation coefficients for radiation factors and the survival rate and the life potential loss

Показатели дожития и потерь жизненного потенциала		Степень тяжести ОЛБ	Доза острого облучения, Гр
До острого облучения		—	—
До диагностики основного заболевания		–0.50	–0.48
После диагностики основного заболевания		–0.54	—
Общая продолжительность жизни		–0.51	–0.30
Доли лиц, умерших в возрасте:	до 40 лет, %	–0.52	–0.49
	в 40–59 лет, %	—	—
	в 60–79 лет, %	–0.46	–0.38
	в 80+ лет, %	–0.29	—
Единичные ПЖП, лет		0.50	0.33
Индекс ПЖП		0.50	0.33

Примечание. Представлены статистически значимые ранговые коэффициенты корреляции ($p < 0.05$).

Таблица 8. Оценка зависимости показателей дожития и потерь жизненного потенциала от натурального логарифма дозы острого внешнего облучения**Table 8.** Association of the survival rate and the life potential loss with a natural log of acute exposure dose

Показатели	Уравнения регрессии	F^*
Период жизни от облучения до диагностики основного заболевания, лет	$= (36.48 \pm 3.57) - (8.21 \pm 1.78) \times \ln \text{ дозы, Гр}$	21.24 ^c
Период жизни после облучения, лет	$= (46.02 \pm 2.98) - (8.41 \pm 1.93) \times \ln \text{ дозы, Гр}$	19.07 ^c
Продолжительность жизни от рождения, лет	$= (75.82 \pm 2.77) - (9.01 \pm 1.71) \times \ln \text{ дозы, Гр}$	27.86 ^d
Единичные ПЖП, чел.-лет	$= (5.32 \pm 2.18) + (8.50 \pm 1.34) \times \ln \text{ дозы, Гр}$	40.18 ^e
Индекс ПЖП	$= (0.038 \pm 0.073) + (0.346 \pm 0.045) \times \ln \text{ дозы, Гр}$	59.68 ^e

Примечание. * F : Критерий Фишера: с – $p < 0.001$; d – $p < 0.0001$; e – $p < 0.00001$.

облучения менее 5 Гр. В результате оценки доли работников, не доживших до 40 лет, было установлено, что самый высокий ОР у работников ОЛБ IV степени тяжести составил 52.0 ($p < 0.001$) относительно работников с ОЛБ О–II степени тяжести, а у работников с ОЛБ III степени тяжести ОР, равный 10.4, имел тенденцию к повышению ($p < 0.1$). В целом в группе с ОЛБ III–IV степени тяжести ОР составил 34.7 ($p < 0.001$) (табл. 9).

В результате подобного анализа у работников, подвергшихся облучению в поглощенных дозах более 10 Гр, ОР составил 35.0 ($p < 0.001$), а при дозах более 5 Гр относительно работников, подвергшихся меньшим дозам облучения – 28.6 ($p < 0.001$). ОР сокращения периода жизни от облучения до диагностики заболевания и периода жизни после облучения менее 20 лет составил при ОЛБ IV степени тяжести 4.0 и 13.0 соответственно, а при ОЛБ III степени тяжести был ста-

Таблица 9. Относительный риск (ОР) ухудшения показателей дожития и потерь жизненного потенциала (ПЖП) у работников с разной степенью тяжести ОЛБ и дозой острого внешнего облучения

Table 9. The relative risk (RR) of deterioration of survival rates and life potential loss in workers with ARS exposed at various acute radiation doses

Показатели	Степень тяжести ОЛБ	ОР	Доза облучения, Гр	ОР
Референтные уровни	0–II	1.00	<5.0	1.00
Не дожившие до 40 лет	III	10.40*	5.0–10.0	8.33*
	IV	52.00 ^c	>10.0	35.00 ^c
	III–IV	34.67 ^c	>5.0	28.57 ^c
Сокращение периода жизни от облучения до диагностики заболевания (менее 20 лет)	III	2.40	5.0–10.0	2.23
	IV	4.00 ^a	>10.0	3.25*
	III–IV	3.64 ^a	>5.0	2.86*
Сокращение периода жизни после облучения (менее 20 лет)	III	5.20*	5.0–10.0	3.33
	IV	13.00 ^c	>10.0	7.50 ^c
	III–IV	9.75 ^b	>5.0	5.7 ^a
Единичные ПЖП больше 25 чел.-лет	III	2.60	5.0–10.0	1.36
	IV	13.00 ^a	>10.0	9.53 ^a
	III–IV	8.67 ^c	>5.0	6.53 ^b
Индекс ПЖП больше 0.35	III	3.47	5.0–10.0	1.19
	IV	8.67 ^b	>10.0	6.25 ^b
	III–IV	6.50 ^a	>5.0	4.08 ^a

Примечание. Отмечены тенденции повышения (* $p < 0.1$) и статистически значимое повышение ОР (a – $p < 0.05$; b – $p < 0.01$; c – $p < 0.001$)

статистически не значимым. В группе работников с ОЛБ III–IV степени тяжести повышение ОР было статистически значимым, но менее выраженным, чем при ОЛБ IV степени тяжести. ОР сокращения данных показателей при дозах облучения более 10 Гр повышался в меньшей степени, чем при ОЛБ IV степени тяжести. ОР повышения единичных ПЖП больше 25 чел.-лет и индекс ПЖП больше 0,35 были также статистически значимо повышены при ОЛБ III–IV и дозах облучения более 5 Гр, особенно, при ОЛБ IV степени тяжести и дозах облучения более 10 Гр (табл. 9). Полученные величины ОР являются очень высокими, что обусловлено чрезвычайно сильным неблагоприятным изменением исследованных показателей ПЖ при ОЛБ тяжелой и крайне тяжелой степени тяжести и дозах острого облучения более 10 Гр.

ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, в группе работников ПО “Маяк” с ОЛБ, подвергшихся в результате аварийных ситуаций острому внешнему облучению в значительных дозах, впервые проведена оценка дожития (смертности) в последовательных периодах жизни по основному заболеванию, явившегося причиной смерти и возрасту, а также по потерям жизненного потенциала. В результате исследования установлено статистически значимое сокращение периода жизни после острого облучения до диагностики основного заболевания, периода жизни от диагностики основного заболевания до смерти и всего периода жизни после облучения. Показано, что доля работников, не доживших до 40 лет, при ОЛБ IV степени тяжести была 100%-ной, а при ОЛБ III степени тяжести наблюдалась в 20% случаев. Близкие результаты

были получены у лиц с ОЛБ, пострадавших в результате радиационной аварии на Чернобыльской АЭС. При ОЛБ меньшей степени тяжести отмечен единственный случай смерти до 40 лет в результате дорожно-транспортного происшествия. Причиной смерти до 40 лет при ОЛБ IV степени тяжести было крайне тяжелое течение заболевания вследствие облучения в экстремальных дозах. При ОЛБ III степени тяжести сокращение ПЖ было обусловлено, главным образом, преждевременной смертностью (в более раннем возрасте) от ЗНО, а также неблагоприятного течения ОЛБ в одном случае. У работников с ОЛБ I–II степени тяжести и участников радиационных аварий структура причин смерти приближалась к общепопуляционным данным.

Важное значение в потенциальной демографии для характеристики жизненного потенциала на шкале продолжительности жизни имеют показатели ПЖП. В результате исследования установлено, что полные ПЖП у всех обследованных работников составили 848 чел.-лет, в том числе 734 чел.-лет (86,6%) – во всех случаях ОЛБ. Частичные ПЖП при отдельных причинах смерти у работников с ОЛБ III–IV были больше (54%), чем при ОЛБ I–II степени тяжести и участников аварий (46%). Единичные ПЖП у работников с ОЛБ III–IV были больше в 5,1 раза, чем при ОЛБ I–II степени тяжести и участников аварий, а индексы ПЖП – в 9,8 раза соответственно. Различия по этим показателям между работниками с дозами облучения более и менее 5 Гр были менее выражены и составили 3,2 и 5,8 раза соответственно. Более высокие значения и доли частичных ПЖП у работников с ОЛБ III–IV степени тяжести были обусловлены в отличие от работников с ОЛБ I–II степени тяжести и участников аварий более высокими единичными ПЖП, а не их распространенностью. Следует отметить, что частичные ПЖП позволяют легко оценить сравнительный вклад отдельных причин смерти в сокращение ОПЖ, т.е. в сокращение ЖП. В литературе для этих целей проводится более трудоемкий метод декомпозиции ОПЖ для отдельных причин смерти [30].

В результате полученных статистически значимых уравнений регрессии установлено, что на 1 Ln дозы облучения период жизни от облучения до диагностики основного заболевания, период жизни после облучения и продолжительность жизни от рождения уменьшаются на 8–9 лет, а единичные ПЖП и индекс ПЖП увеличиваются на 8,5 чел.-лет и 0,35 соответственно. Полученные зависимости могут быть использованы для прогностической оценки дожития и ПЖП у лиц, пострадавших в результате

радиационных аварий и инцидентов. ОР повышения доли работников с ОЛБ IV степени тяжести и с дозами облучения более 10 Гр, не доживших до 40 лет, относительно работников с ОЛБ I–II степени тяжести, участников аварий и с дозами менее 5 Гр были чрезвычайно высоким и составил 52,0 и 35,0 соответственно. Такие высокие значения ОР, очевидно, обусловлены чрезвычайно неблагоприятным воздействием острого облучения в высоких дозах на жизненный потенциал человека, который, в конечном счете, определяет предстоящую ПЖ в разные возрастные периоды.

В заключение необходимо отметить, что степень тяжести ОЛБ в отличие от доз острого облучения дает более значимую характеристику наблюдаемых изменений дожития и ПЖП, что, очевидно, можно объяснить наличием в проявлениях степени тяжести ОЛБ фактора радиочувствительности. Следует также подчеркнуть, что важную научную информацию по данной проблеме можно получить у чернобыльцев с ОЛБ, которые к настоящему времени в среднем дожили до 72 лет [28]. Согласно таблице смертности когорты работников ПО “Маяк” 1948–1958 годов найма естественная убыль в когорте чернобыльцев с ОЛБ от их среднего возраста на момент аварии (36,1 лет) может составлять 67,1%, что больше критического уровня (>50%) для проведения подобного анализа [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в группе работников ПО “Маяк” с ОЛБ, подвергшихся в результате аварийных ситуаций острому внешнему облучению в значительных дозах, проведена оценка дожития и ПЖП. В результате проведенного исследования установлено статистически значимое сокращение периода жизни после острого облучения до диагностики основного заболевания, явившегося причиной смерти, периода ПЖ от диагностики основного заболевания до смерти и всего периода жизни после облучения. Показано, что все работники с ОЛБ IV степени тяжести не дожили до 40 лет, а при ОЛБ III степени тяжести, главным образом, – до 60 лет. Причиной сокращения ПЖ при ОЛБ IV степени тяжести было крайне тяжелое течение заболевания вследствие облучения в очень высоких дозах. При ОЛБ III степени тяжести сокращение ПЖ было обусловлено преимущественно преждевременной смертностью от ЗНО. У работников с ОЛБ I и II степени тяжести, а также у участников аварий без ОЛБ, структура причин смерти статистически значимо не отличалась от общероссийских значений. Полученные регрессионные зависимости исследованных показателей

будут полезны для прогностической оценки дожития и ПЖП у лиц, подвергшихся аварийному облучению. Высокие значения относительного риска, очевидно, обусловлены чрезвычайно неблагоприятным воздействием острого облучения в больших дозах на дожитие и потери жизненного потенциала человека.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Настоящее исследование выполнено при поддержке Федерального медико-биологического агентства России в рамках Государственного контракта от 15 июня 2021 г. № 11.315.21.2.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярмоненко С.П., Вайнсон А.А. Радиобиология человека и животных: Учеб. пособие. М.: Высшая школа, 2004. 549 с. [Jarmonenko S.P., Vajnsn A.A. Radiobiologija cheloveka i zivotnyh: Ucheb. posobie = Radiobiology of humans and animals: Ucheb. posobie. M.: Vysshaja shkola, 2004. 549 p. (In Russ.)]
2. Калистратова В.С., Беляев И.К., Жорова Е.С. и др. Радиобиология инкорпорированных радионуклидов. Под ред. В.С. Калистратовой. Изд. 2-е. М.: ФГБУ ГНЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2016. 556 с. [Kalistratova V.S., Beljaev I.K., Zhorova E.S. et al. Radiobiologija inkorporirovannyh radionuklidov = Radiobiology of incorporated radionuclides. Ed. V.S. Kalistratova. Izd. 2-e. M.: FGBU GNC im. A.I. Burnazjana FMBA Rossii, 2016. 556 p. (In Russ.)]
3. Hauptmann M., Mohan A.K., Doody M.M. et al. Mortality from diseases of the circulatory system in radiologic technologists in the United States. *Am. J. Epidemiol.* 2003;157(3):239–248. DOI: 10.1093/aje/kwf189.
4. Berrington A., Darby S.C., Weiss H.A., Doll R. 100 years of observation on British radiologists: mortality from cancer and other causes 1897–1997. *Br. J. Radiol.* 2001;74(882):507–519. DOI: 10.1259/bjr.74.882.740507.
5. Cologne J.B., Preston D.L. Longevity of atomic-bomb survivors. *Lancet.* 2000;356(9226):303–311. DOI: 10.1016/S0140-6736(00)02506-X.
6. Vrijheid M., Cardis E., Ashmore P. et al. Mortality from diseases other than cancer following low doses of ionizing radiation: results from the 15-Country Study of nuclear industry workers. *Int. J. Epidemiol.* 2007;36(5):1126–1135. DOI: 10.1093/ije/dym138.
7. Polednak A.P., Stehney A.F., Rowland R.E. Mortality among women first employed before 1930 in the U.S. radium dial-painting industry. A group ascertained from employment lists. *Am. J. Epidemiol.* 1978;107(3):179–195. DOI: 10.1093/oxfordjournals.aje.a112524.
8. Spiess H. Life-span study on late effects of ^{224}Ra in children and adults. *Health Phys.* 2010;99(3):286–291. DOI: 10.1097/HP.0b013e3181cb857f.
9. Тельнов В.И., Третьяков Ф.Д., Окatenко П.В. Инкорпорация плутония-239 и сокращение продолжительности жизни у работников ПО “Маяк” при опухолевых и неопухолевых причинах смерти. *Мед. радиология и радиац. безопасность.* 2017;62(2):28–34. [Tel'nov V.I., Tret'jakov F.D., Okatenko P.V. Pu-239 incorporation and lifetime reduction in Mayak PA workers with tumor and non-tumor related death. *Medical Radiology and Radiation Safety.* 2017;62(2):28–34. (In Russ.)]
10. Тельнов В.И., Легких И.В., Окatenко П.В. Анализ зависимости показателей продолжительности жизни от инкорпорации плутония-239 у работников атомной промышленности при опухолевых и неопухолевых причинах смерти. *Мед. радиология и радиац. безопасность.* 2021;66(6):57–62. [Tel'nov V.I., Ljogkih I.V., Okatenko P.V. Analysis of relation between lifetime rates and incorporation of plutonium-239 in atomic production workers regarding tumor and non-tumor causes of death. *Medical Radiology and Radiation Safety.* 2021;66(6):57–62. (In Russ.)]
11. Тельнов В.И. Сокращение продолжительности здоровой жизни до диагностики злокачественных новообразований у работников ПО “Маяк” при инкорпорации ^{239}Pu . *Вопр. радиационной безопасности.* 2021;2:61–69. [Tel'nov V.I. Reduction in healthy life expectancy before diagnostics of malignant neoplasms in the Mayak PA workers at ^{239}Pu incorporation. *Radiation Safety Issues.* 2021;2:61–69. (In Russ.)]
12. Тельнов В.И., Азизова Т.В., Мосеева М.Б., Банникова М.В. Продолжительность жизни у работников ПО “Маяк” после острой лучевой болезни разной степени тяжести. *Радиационная гигиена.* 2023;16(1):80–90. [Tel'nov V.I., Azizova T.V., Moseeva M.B., Bannikova M.V. Lifetime of Mayak workers after acute radiation syndrome of various severity levels. *Radiation Hygiene.* 2023;16(1):80–90. (In Russ.)] DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-80-90.
13. Фильрозе Э. Очерк потенциальной демографии. Пер. с польского. М.: Статистика, 1975. 216 с. [Fil'roze Je. Ocherk potencial'noj demografii. Per. s pol'skogo = Essay on Potential Demography. Translated from Polish. Moscow: Statistika, 1975. 216 p. (In Russ.)]
14. Жизненный потенциал. Демографическая энциклопедия. Редколлегия. Ткаченко А.А., Аношкин А.В., Денисенко М.Б. и др. М.: ООО “Изд-во “Энциклопедия”, 2013. С. 284–285. [Zhiznennyj potencial = Life potential. Demographic encyclopedia. Redkollegija. Tkachenko A.A., Anoshkin A.V., Denisenko M.B. et al. Moscow: ООО “Izdatel'stvo “Jenciklopedija”, 2013. P. 284–285. (In Russ.)]

15. Бойко А.И., Брусникина С.Н., Егорова Е.А. и др. Демографическая статистика. М.: КНОРУС, 2010. 480 с. [Boyko A.I., Brusnikina S.N., Egorova E.A. et al. Demograficheskaja statistika = Demographic statistics. Moscow: KNORUS, 2010. 480 p. (In Russ.)]
16. Тельнов В.И. Индекс жизненного баланса как показатель старения населения. *Успехи геронтологии*. 2022;35(4):640–641. [Tel'nov V.I. Indeks zhiznennogo balansa kak pokazatel' starenija naselenija = Life balance index as an indicator of population aging. *Uspehi Gerontologii = Advances in Gerontology*. 2022;35(4):640–641. (In Russ.)]
17. Сафарова Г.Л., Сафарова А.А., Лисененко А.И. Динамика жизненного потенциала России в условиях старения населения. Развитие населения и демографическая политика. Памяти А.Я. Кваши: Сборник статей. Под ред. М.Б. Денисенко, В.В. Елизарова. М.: Проспект, 2014. С. 298–314. [Safarova G.L., Safarova A.A., Lisenenko A.I. Dinamika zhiznennogo potentsiala Rossii v uslovijah starenija naselenija. Razvitie naselenija i demograficheskaja politika. Pamjati A.Ja. Kvashi: Sbornik statej. Eds. M.B. Denisenko, V.V. Elizarov. M.: Prospekt, 2014. P. 298–314. (In Russ.)]
18. Флоринская Ю.Ф. Потери жизненного потенциала населения регионов России. *Мир России*. 1998; 7(1-2):257–272. [Florinskaja Ju.F. Poteri zhiznennogo potentsiala naselenija regionov Rossii = Loss of life potential of the population of Russian regions. *Mir Rossii*. 1998;7(1-2):257–272. (In Russ.)]
19. Diandini R., Takahashi K., Park E.K. et al. Potential years of life lost caused by asbestos-related diseases in the world. *Am. J. Ind. Med.* 2013;56(9):993–1000. DOI: 10.1002/ajim.22206.
20. Тельнов В.И. Оценка потерь жизненного потенциала у работников ПО “Маяк”, населения г. Озёрска и России при основных причинах смерти. Мат. XXIII Всероссийской научно-практической конференции “Дни науки ОТИ НИЯУ МИФИ – 2023”, Озёрск, 19–21 апреля 2023 г. Озёрск: ОТИ НИЯУ МИФИ, 2023. С. 60–64. [Tel'nov V.I. Ocenka poter' zhiznennogo potentsiala u rabotnikov PO “Majak”, naselenija g. Ozerska i Rossii pri osnovnyh pričinah smerti = Estimation of losses of vital potential among workers of the Mayak Production Association, the population of Ozersk and Russia under the main causes of death. Materialy XXIII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii “Dni nauki OTI NIJaU MIFI – 2023”, Ozersk, 19–21 aprelja 2023. Ozjorsk: OTI NIJaU MIFI, 2023, P. 60–64 (In Russ.)]
21. Азизова Т.В., Мосеева М.Б., Осовец С.В., Сумина М.В. Регистр острой лучевой болезни, зарегистрированной у работников предприятия атомной промышленности “Маяк”. *Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях*. 2011;4:14–19. [Azizova T.V., Moseeva M.B., Osovets S.V., Sumina M.V. Registr ostroj luchevoj bolezni, zaregistrirovannoj u rabotnikov predprijatija atomnoj promyshlennosti “Majak” = Registry of acute radiation syndrome diagnosed among nuclear workers at the Mayak PA. *Mediko-biologicheskie i social'no-psihologicheskie problemy bezopasnosti v chrezvychajnyh situacijah = Medico-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situations*. 2011;4:14–19. (In Russ.)]
22. Azizova T.V., Osovets S.V., Day R.D. et al. Predictability of acute radiation injury severity. *Health Phys.* 2008;94(3):255–263. DOI: 10.1097/01.HP.0000290833.66789.df.
23. Азизова Т.В., Тельнов В.И., Мосеева М.Б. Острая лучевая болезнь в когорте работников, подвергшихся профессиональному облучению. XXII все-российская научно-практическая конференция “Дни науки – 2022”: Мат. конференции, Озёрск, 20–23 апреля 2022 г. Озёрск: ОТИ НИЯУ МИФИ, 2022. С. 44–48. [Azizova T.V., Tel'nov V.I., Moseeva M.B. Ostraj a luchevoja bolezni' v kogorte rabotnikov, podvergshihsja professional'nomu oblucheniju = Acute radiation sickness in a cohort of workers exposed to occupational radiation. XXII vserossijskaja nauchno-prakticheskaja konferencija “Dni nauki – 2022”: Materialy konferencii. Ozjorsk, 20–23 aprelja 2022 g. Ozjorsk: OTI NIJaU MIFI, 2022. P. 44–48. (In Russ.)]
24. Vasilenko E.K., Khokhryakov V.F., Miller S.C. et al. Mayak worker dosimetry study: an overview. *Health Phys.* 2007;93(3):190–206. DOI: 10.1097/01.HP.0000266071.43137.0e.
25. Ediev D.M. Life expectancy in developed countries is higher than conventionally estimated. Implication from improved measurement of human longevity. *Eur. Demogr. Res. Papers*. 2010;1:1–35.
26. Демографический ежегодник России. 2019: Статистический сборник. М.: Росстат, 2019. 252 с. [Demograficheskij ezhegodnik Rossii 2019 = Demographic yearbook of Russia. 2019: Statisticheskij sbornik. M.: Rosstat, 2019. 252 p. (In Russ.)]
27. Гуськова А.К., Краснюк В.И. Последствия для здоровья аварии ЧАЭС: основные итоги и нерешенные проблемы. *Радиационная гигиена*. 2011;4(4):5–15. [Gus'kova A.K., Krasnyuk V.I. Consequences for health after the Chernobyl accident: main results and unsolved problems. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2011;4(4):5–15. (In Russ.)]
28. Острая лучевая болезнь. Атлас. Ч. 1. Пострадавшие при радиационной аварии на ЧАЭС 1986 г. Под ред. А.С. Самойлова и В.Ю. Соловьева. М.: ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2016. 140 с. [Ostraja luchevoja bolezni'. Atlas. Chast' 1. Postradavshie pri radiacionnoj avarii na ChAJeS 1986 g. = Acute radiation sickness. Atlas. Part 1. Victims of the radiation accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant in 1986. Eds. A.S. Samojlov, V.Ju. Solov'ev. M.: FGBU GNC FMBC im. A.I. Burnazjana FMBA Rossii, 2016. 140 p. (In Russ.)]
29. Тельнов В.И. Оценка роли генетических факторов в радиорезистентности людей. *Генетика*. 2005;41(1):85–92. [Tel'nov V.I. The Role of Genetic Factors in Human Radioresistance. *Russian Journal of Genetics*. 2005;41(1):72–78.]

30. Белтран-Санчес Х., Престон С.Х., Канудас-Ромо В. Интегрированный подход к анализу смертности по причинам смерти: таблицы смертности при условии устранения отдельных причин смерти и декомпозиция ожидаемой продолжительности жизни. *Демографическое обозрение*. 2018;5(1):138–164.

(Электронный научный журнал). [Beltran-Sanches H., Preston S.H., Kanudas-Romo V. An integrated approach to cause-of-death analysis: cause-deleted life tables and decompositions of life expectancy. *Demographic Review*. 2018;5(1):138–164. (In Russ.)]

The Analysis of Survival and Life Potential Loss in Workers Diagnosed with Acute Radiation Sickness Following a Radiation Accident

V. I. Telnov*, T. V. Azizova, M. B. Moseeva, M. V. Bannikova

Southern Urals Biophysics Institute affiliated to the Federal Medical Biological Agency, Ozyorsk, Russia

**E-mail: clinic@subi.su*

Evaluation of ionizing radiation impact on life expectancy rates in humans is one of the topical problems of the radiation medicine. The present study aimed to analyze survival rates and the life potential loss in workers of the Mayak PA after the acute radiation sickness due to radiation accidents and in radiation accident participants who had not suffered from the acute radiation sickness. The analysis considered 64 workers of the Mayak PA (54 males and 10 females), and it was performed using the STATISTICA 10 software. We evaluated survival rates prior to and after the main disease that had caused death, percentages of individuals who had not survived to 40, 60, 80 and 80+ years, and total, partial and single (weighted means) life potential loss and the index of the life potential loss. The analysis revealed that workers with severe and extremely severe acute radiation sickness demonstrated deteriorated survival rates and the increased life potential loss compared either to workers with moderate and modest acute radiation sickness or to radiation accident participants. The cause for such estimates in workers with severe and extreme severe sickness was the extreme course of the sickness. In cases of the severe sickness, the shortening of life duration was caused mainly by the preliminary death from malignant neoplasms and the acute radiation sickness. We observed the linear regression association of survival rates and life potential loss with \ln of radiation dose. The relative risk of deterioration of the survival rate and the increase of the life potential loss was considerably higher (3.64–52.0 times, $p < 0.05$ – 0.001) in workers with the severe and extreme severe acute radiation sickness acutely exposed at higher doses (above 5 or 120 Gy) compared to other workers.

Keywords: Mayak PA workers, radiation accidents, acute radiation exposure, acute radiation sickness, survival rates, life potential loss, causes of death, regression, relative risk

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тельнов Виталий Иванович (Telnov Vitaliy Ivanovich), 0000-0003-3509-5372, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Южно-Уральский институт биофизики» Федерального медико-биологического агентства России, г. Озёрск, Россия (South Ural Biophysics Institute affiliated to the Federal Medical Biological Agency, Ozyorsk, Russia); e-mail: tvi@subi.su

Азизова Тамара Васильевна (Azizova Tamara Vasil'evna), 0000-0001-6954-2674, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Южно-Уральский институт биофизики» Федерального медико-биологического агентства России, г. Озёрск, Россия (South Ural Biophysics Institute affiliated to the Federal Medical Biological Agency, Ozyorsk, Russia); e-mail: clinic@subi.su

Мосеева Мария Борисовна (Moseeva Mariya Borisovna), 0000-0003-3741-6600, Федеральное госу-

дарственное бюджетное учреждение науки «Южно-Уральский институт биофизики» Федерального медико-биологического агентства России, г. Озёрск, Россия (South Ural Biophysics Institute affiliated to the Federal Medical Biological Agency, Ozyorsk, Russia); e-mail: moseeva@subi.su

Банникова Мария Владимировна (Bannikova Mariya Vladimirovna), 0000-0002-2755-6282, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Южно-Уральский институт биофизики» Федерального медико-биологического агентства России, г. Озёрск, Россия (South Ural Biophysics Institute affiliated to the Federal Medical Biological Agency, Ozyorsk, Russia); e-mail: bannikova@subi.su

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.