

А.И. Горский, М.А. Максютков, К.А. Туманов, Е.В. Кочергина, Н.С. Зеленская, В.К. Иванов

ПРОГНОЗ СМЕРТНОСТИ В КОГОРТЕ РОССИЙСКИХ УЧАСТНИКОВ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба — филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава РФ, Обнинск

Контактное лицо: Антон Игоревич Горский, gorski@nrer.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Анализ и прогноз динамики смертности, отдельных причин смерти и структуры смертности в когорте мужчин — ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС за период наблюдения с 1992 по 2017 гг.

Материал и методы: В анализе смертности и для прогноза использованы персональные данные по смертности ликвидаторов за период наблюдения 1992–2017 гг., накопленные в Национальном радиационно-эпидемиологическом регистре (НРЭР). В когорту наблюдения включены ликвидаторы 1986–1987 гг. въезда в зону облучения, получившие документированную в НРЭР дозу. Численность когорты в 1992 г. составляла 72432 человека, средняя доза — 130,8 мГр. За период наблюдения в когорте зафиксировано 27051 случай смерти, из них: злокачественные новообразования (ЗНО) — 4621, болезни системы кровообращения (БСК) — 11410, травмы и отравления (ТО) — 5110, остальные, кроме перечисленных (другие), — 5910. Для прогноза смертности и ее структуры использованы возрастные показатели интенсивности парциальных процессов смертности и смертности в целом, полученные за период наблюдения.

Результаты: Прогнозируемая численность когорты в 2030 г. — 22000 человек. Структура смертности в 2017 г.: ЗНО — 17 %, БСК — 42 %, ТО — 19 %, другие — 22 %. Прогнозируемая структура в 2030 г.: ЗНО — 24 %, БСК — 49 %, ТО — 11 %, другие — 16 %. Средняя ожидаемая продолжительность предстоящей жизни членов когорты в 2017 г. составляет 11,1 года (средний возраст ликвидаторов в 2017 г. — 62,4 года), тогда ожидаемая продолжительность жизни ликвидаторов с 2017 г. составит 73,5 года. Ожидаемая продолжительность жизни когорты ликвидаторов с показателями смертности 2017 г. для мужского населения России населения равна 70,4 года. Наблюдаемый эффект увеличения продолжительности жизни ликвидаторов может быть обусловлен эффектом «здоровых рабочих», мерами социальной поддержки, включая специализированную диспансеризацию, а также нельзя исключить и влияние естественного отбора.

Заключение: Проведенный анализ для рассматриваемой популяции служит инструментом для проведения мероприятий по повышению эффективности специализированной медицинской помощи ликвидаторам. Результаты данного исследования полезны для анализа смертности замкнутых (фиксированных по численности в определенный момент) популяций, подвергшихся воздействию вредных для здоровья техногенных факторов.

Ключевые слова: ликвидаторы последствий аварии на ЧАЭС, прогноз смертности, Национальный радиационно-эпидемиологический регистр, структура смертности, злокачественные новообразования, болезни системы кровообращения, травмы и отравления, средняя продолжительность жизни

Для цитирования: Горский А.И., Максютков М.А., Туманов К.А., Кочергина Е.В., Зеленская Н.С., Иванов В.К. Прогноз смертности в когорте российских участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020;65(5):35-41.

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-5-35-41

Введение

Основным источником информации о динамике состояния здоровья облученных лиц и о медицинских радиологических последствиях аварии на ЧАЭС в Российской Федерации является Национальный радиационно-эпидемиологический регистр (НРЭР), созданный в 1986 г. сразу после аварии по решению Правительства Советского Союза. НРЭР представляет собой государственную информационную систему персональных данных граждан, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС, других радиационных аварий, ядерных испытаний и иных радиационных катастроф и инцидентов. Одной из основных целей НРЭР является прогнозирование медицинских радиологических последствий для облученного населения России.

В настоящее время в НРЭР зарегистрировано около 200 тыс. ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС (далее — ликвидаторы), которые являются самой облученной категорией среди всех категорий граждан, подвергшихся радиационному воздействию в результате аварии на ЧАЭС. Средняя доза внеш-

него облучения, полученная ликвидаторами за период участия в аварийных работах, составляет около 100 мГр.

Ликвидаторы живут практически во всех регионах России, поэтому когорта ликвидаторов является достаточно репрезентативной выборкой, позволяющей адекватно оценить состояние здоровья мужского взрослого населения РФ в соответствующих возрастных диапазонах. Напомним, что мужчины составляют подавляющую (97 %) часть общей когорты ликвидаторов.

Рассматриваемая в настоящей статье когорта является замкнутой (с фиксированной численностью в определенный момент времени) и изучение динамических, демографических характеристик когорты актуально для анализа смертности в замкнутых популяциях, подвергшихся воздействию вредных техногенных факторов.

Основной целью данной работы является прогноз динамики и структуры смертности в когорте ликвидаторов, который будет определять стратегию мероприятий практического здравоохранения в будущем для этой категории населения РФ.

Таблица 1

Характеристики когорты ликвидаторов для анализа смертности
Description of the of emergency clean up workers cohort used for mortality analysis

Характеристика	Значение
Регистрация в НРЭР	до 01.01.1992 г.
Годы въезда в зону аварии	1986–1987
Пол	мужской
Возраст на момент въезда, лет	18–70
Наличие данных о состоянии здоровья с 01.01.1992 по 31.12.2017 гг.	да
Наличие документированной дозы облучения	да
Средняя документированная доза, мГр	131
Интервал документированных доз, мГр	1–700
Период наблюдения, годы	1992–2017
Общая численность в когорте наблюдения (на 1992 г.), человек	72432 (100 %)
Число умерших и выбывших из наблюдения за весь период, человек	35314 (49 %)
Общее число смертей от всех причин	27051 (37 %)
Число смертей от злокачественных новообразований (ЗНО)	4621 (17 %)
Число смертей от болезней системы кровообращения (БСК)	11410 (42 %)
Число смертей от травм и отравлений (ТО)	5110 (19 %)
Число остальных смертей (кроме ЗНО, БСК и ТО)	5910 (22 %)

Материал и методы

Исходными данными для анализа являются результаты наблюдения за ликвидаторами (жителями России), накопленные в НРЭР за период с 1992 по 2017 гг., приведенные в табл. 1.

Смертность является основным индикатором состояния здоровья популяции. Процесс смертности представляет собой цепочку времен и типов событий. События можно рассматривать как переход из одного состояния в другое, в рамках описания истории событий часто используются модели со многими состояниями (multi-state models), которые описаны, например, в [1–4]. Рассмотрим основные модели, используемые в анализе процессов заболеваемости и смертности.

Модель процесса смертности с двумя состояниями

Наиболее простая модель двух состояний с одним переходным состоянием «0:жив» и терминированным состоянием «1:умер», из которого переходы в другие состояния невозможны (рис. 1).

Наблюдения за данным индивидуумом в этом случае будут иметь простую форму в виде одной случайной переменной T , представляющей время от начала наблюдения до появления события «смерть». Переменную T можно определить через функцию распределения вероятности $F(t) = Prob(T \leq t)$ или через функцию вероятности остаться живым $S(t) = 1 - F(t) = Prob(T > t)$. Если индивидуум был в состоянии 0 в момент времени $t = 0$, тогда $F(t)$ — вероятность

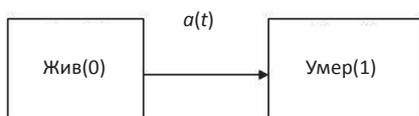


Рис. 1. Модель процесса смертности с двумя состояниями
 Fig. 1. Model of mortality from two concomitant events

перехода из состояния 0 в состояние 1 за интервал времени от 0 до t . Если время наблюдения непрерывно, распределение T можно выразить через функцию интенсивности риска (hazard rate function):

$$\alpha(t) = -\frac{d}{dt} \cdot \ln S(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Prob(T \leq t + \Delta t | T \geq t)}{\Delta t}. \quad (1)$$

Таким образом $\alpha(\cdot)$ — интенсивность перехода из состояния 0 в состояние 1 есть вероятность перейти из состояния 0 в состояние 1 в единицу времени.

Из выражения (1) следует, что вероятность остаться живым равна:

$$S(t) = \exp\left(-\int_0^t \alpha(u) \cdot du\right). \quad (2)$$

Модель процесса смертности с конкурирующими рисками

Как правило, процесс изменения численности когорты во времени сопровождается несколькими причинами смерти, кроме того, часть членов когорты выбывает из-под наблюдения вследствие потери наблюдения в рассматриваемый период времени. В этом случае имеется одно переходное состояние «0» и число k терминальных (поглощающих) состояний h , $h = 1, 2, \dots, k$, соответствующих смерти от разных причин и потери наблюдения. Таким образом, мы имеем $p = k + 1$ состояний. Модель иллюстрируется на рис. 2.

Интенсивности перехода $\alpha_{0,h}(t)$ для $h = 1, 2, \dots, k + 1$ определяются для причины выхода из наблюдения h из функции риска:

$$\alpha_h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Prob(\text{смерть (выход) от причины } h \text{ при } t + \Delta t | T \geq t)}{\Delta t}, \quad (3)$$

где T — время наблюдения, при этом $\alpha_{h,j} = 0$ для всех $h \neq 0$ и всех j .

Вероятность быть под наблюдением в интервал времени от 0 до t для k причин выбытия выразится формулой:

$$P_{00}(0, t) = S(t) = Prob(T > t) = \exp\left(-\int_0^t \sum_{h=1}^k \alpha_h(u) \cdot du\right). \quad (4)$$

В принципе модель можно использовать для прогноза заболеваемости, если заболеваемость рассматривать как хроническую (терминальное со-

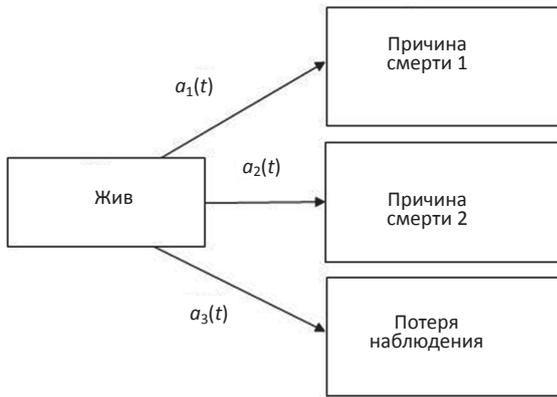


Рис. 2. Модель процесса смертности конкурирующих рисков для двух причин смерти и потери наблюдения
 Fig. 2. Model of mortality from concurrent risks of two causes of death and the loss to follow-up

стояние) и использовать вероятность перехода для заблеваемости.

Моделирование процессов смертности проведем с учетом накопленной информации о каждом ликвидаторе в несколько этапов:

1. Моделирование интенсивности каждого изучаемого процесса.
2. Моделирование возрастной структуры когорты.
3. Моделирование динамики и годового числа событий рассматриваемого процесса и их прогноз.

Рассмотрим основные процессы, которые определяют изменение численности наблюдаемой когорты во времени:

1. Потеря наблюдения за ликвидаторами.
2. Смертность от всех причин, включая: смертность от солидных раков (коды МКБ-10 C80–C81); смертность от болезней системы кровообращения (коды МКБ-10 I00–I99); смертность от травм и отравлений (коды МКБ-10 S00–T98); смертность от причин, кроме перечисленных.

Наблюдаемая зависимость интенсивности определенного процесса $\lambda^h(u)$ от возраста u моделировалась полиномом третьей степени с использованием подгонки методом Левенберга–Маккардта [5, 6]:

$$\lambda^h(u) = \frac{\sum_j c_j^h(u)}{\sum_j pyr_j(u)} = k_0^h + k_1^h \cdot u + k_2^h \cdot u^2 + k_3^h \cdot u^3, \quad (5)$$

где $c_j^h(u)$ — количество случаев смерти от причины h в календарном году j ; $pyr_j(u)$ — число человеко-лет

наблюдения в календарном году j . Суммирование ведется по всем годам наблюдения с 1992 по 2017 гг.

Коэффициенты полинома для всех рассматриваемых процессов выбытия ликвидаторов из-под наблюдения приведены в табл. 2.

Имея интенсивность выбытия ликвидаторов из-под наблюдения от всех причин, можно смоделировать динамику возрастной структуры n наблюдаемой когорты ликвидаторов через время наблюдения t , используя функцию $P_{00}(g,t)$ (4), которая представляет долю ликвидаторов, статус которых известен, как «жив» с возраста g до момента времени t (возраста $g + t$):

$$n(g + t, t) = N(g, 0) \times P_{00}(g, t), \quad (6)$$

где $N(g, 0)$ — численность ликвидаторов возраста g в 1992 г.

Ожидаемая средняя продолжительность жизни (LT) является важным показателем здоровья когорты или популяции людей. Величина LT, как функция времени, рассчитывалась как:

$$LT = \sum_{g=a_{\min}}^{a_{\max}} \varepsilon_{g,2017} \cdot (g + \int_g^{a_{\max}} P_{00}(x, a_{\max} - x) \cdot dx), \quad (7)$$

где a_{\min} (a_{\max}) — минимальный (максимальный) возраст членов когорты в 2017 г.; $\varepsilon_{g,2017}$ — доля численности ликвидаторов возраста g в 2017 г. от полной численности когорты. Интеграл в формуле (7) моделирует продолжительность предстоящей жизни после 2017 г. для ликвидаторов возраста g .

Для сглаживания временных колебаний с целью оценки тренда структуры смертности использована кумулятивная сумма, и вклад определенной причины h смерти $\omega_{0,h}$ определялся как:

$$\omega_{0,h}(t) = P_{0,h}(t) / \sum_h P_{0,h}(t), \quad (8)$$

где $P_{0,h}(t)$ — моделированное или фактическое кумулятивное число случаев смерти от причины h в момент времени t ; $\sum_h \omega_{0,h}(t) = 1$ в любой момент времени.

Результаты

Рис. 3 иллюстрирует фактические данные и их моделирование для интенсивности выбытия по возрасту от всех причин, динамику наблюдаемой когорты и ее прогноз до 2030 г. Как следует из рис. 3, модель (5) адекватно описывает данные наблюдений по интенсивности и численности рассматриваемой

Таблица 2

Коэффициенты моделей интенсивности рассматриваемых процессов
 Factors of models for processes intensity

Причины потери наблюдения	Коэффициенты			
	k_0	k_1	k_2	k_3
Все причины выбытия	$1,48 \times 10^{-4}$	$2,82 \times 10^{-4}$	$2,56 \times 10^{-6}$	$2,41 \times 10^{-8}$
Смертность от всех причин	$3,86 \times 10^{-5}$	$-3,91 \times 10^{-4}$	$1,92 \times 10^{-5}$	$-8,32 \times 10^{-8}$
Смертность от ЗНО	$4,16 \times 10^{-6}$	$7,01 \times 10^{-5}$	$-5,30 \times 10^{-6}$	$9,75 \times 10^{-8}$
Смертность от ТО	$-1,06 \times 10^{-5}$	$-5,49 \times 10^{-5}$	$7,60 \times 10^{-6}$	$-9,72 \times 10^{-8}$
Смертность от БСК	$1,33 \times 10^{-5}$	$-7,40 \times 10^{-5}$	$9,90 \times 10^{-7}$	$6,49 \times 10^{-8}$
Остальные причины смерти	$4,03 \times 10^{-6}$	$-1,57 \times 10^{-4}$	$7,92 \times 10^{-6}$	$-6,27 \times 10^{-8}$

Примечание: ЗНО — злокачественные новообразования; ТО — травмы и отравления; БСК — болезни системы кровообращения

когорты. Например, в возрасте 60 лет интенсивность выбытия составляет 32 случая на 1000 человек в год, в 2030 г., согласно прогнозу, ожидается численность когорты примерно в 22000 человек, ожидаемое время существования когорты после 2017 г. составит примерно 25 лет.

Результаты моделирования возрастной структуры на начало наблюдения в 1992, 2017 и 2030 г. представлены на рис. 4. Результаты, приведенные на рис. 4, подтверждают корректное моделирование возрастной структуры через 25 лет после начала наблюдения с использованием модели интенсивности всех потерь наблюдения за ликвидаторами.

Смертность от всех причин и ее прогноз

Модель интенсивности смертности от всех причин в зависимости от возраста и данные наблюдений по интенсивности приведены на рис. 5. На этом же рисунке справа приведена динамика годовой смертности и ее прогноз до 2030 г. Как следует из рис. 5, модель интенсивности хорошо описывает фактические данные. По данным прогноза, в 2030 г. ожидается около 42000 смертей от всех причин.

Смертность от отдельных причин (ЗНО, БСК, ТО и остальные)

Модельная и фактическая интенсивность смерти и динамика кумулятивной смертности от ЗНО иллюстрируется рис. 6.

Смертность от БСК является одной из основных причин смерти в современных популяциях. На рис. 7

приведена интенсивность смерти и динамика кумулятивной смертности (правый рисунок) от БСК. Как следует из рис. 6, 7, для смертности от ЗНО и БСК наблюдается хорошее согласие наблюдений с моделью.

Травмы и отравления играют заметную роль в структуре общей смертности ликвидаторов (табл. 1). Интенсивность смерти и годовая смертность от этой причины приводится на рис. 8. Если для других причин смерти интенсивность растет с возрастом, то для травм и отравлений зависимость имеет сложную форму с максимумом в возрасте 50 лет.

Наблюдаемая кумулятивная смертность на рис. 8 превышает прогнозные оценки в период с 2000 по 2005 гг. и отражает повышенный рост смертности от травм и отравлений в этот период. Напомним, что прогноз основан на интенсивностях, составляющих смертность процессов за весь период наблюдения. Причина наблюдаемого роста смертности требует дополнительного изучения.

Интенсивность смертности и годовая смертность от других причин иллюстрируется рис. 9.

Наблюдаемая и модельная структура смертности по рассматриваемым причинам приведена на рис. 10. Согласно данным прогноза, приведенным на рис. 10, в 2017 г. доля смертности от ЗНО и смерти от травм и отравлений составляет 18 %, для БСК — 42 % и для других причин смерти — 22 %. Вклад травм и отравлений уменьшается во времени (11 % в 2030 г.), вклад случаев смерти от ЗНО увеличивается, достигая в

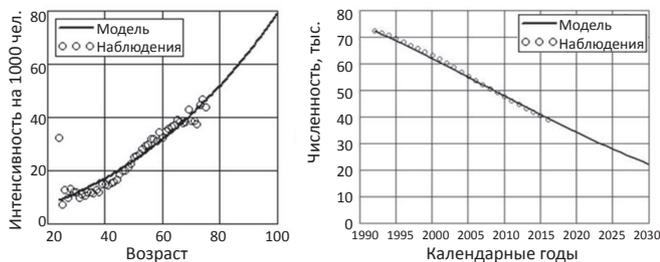


Рис. 3. Модель и фактические данные интенсивности выбытия ликвидаторов из наблюдения от всех причин и динамика численности когорты

Fig. 3. Model and actual data on rates of all-case loss to follow-up of emergency clean-up workers and dynamics of the cohort size

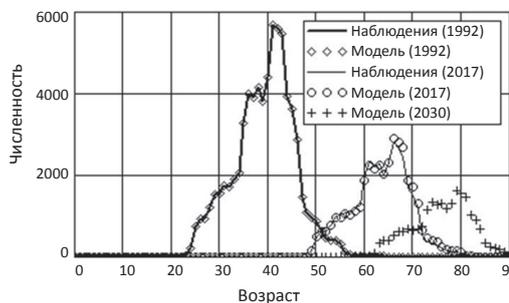


Рис. 4. Динамика возрастной структуры когорты, фактические данные и их моделирование

Fig. 4. Dynamics of the cohort age structure: actual and modeling data

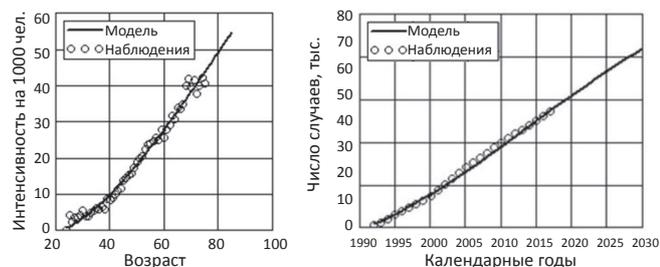


Рис. 5. Интенсивность смертности от всех причин в зависимости от возраста и динамика кумулятивной смертности

Fig. 5. Age-specific all-cause mortality rates and dynamics of cumulative mortality

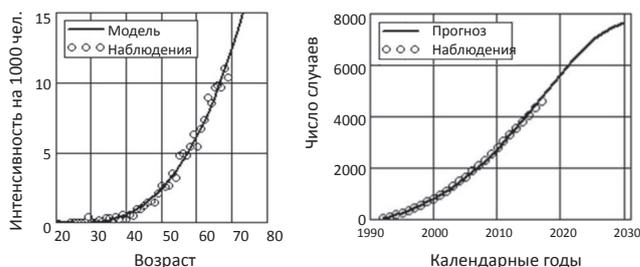


Рис. 6. Интенсивность смертности от ЗНО в зависимости от возраста и динамика кумулятивной смертности

Fig. 6. Age-specific mortality rate and dynamics of cumulative mortality from malignant neoplasms

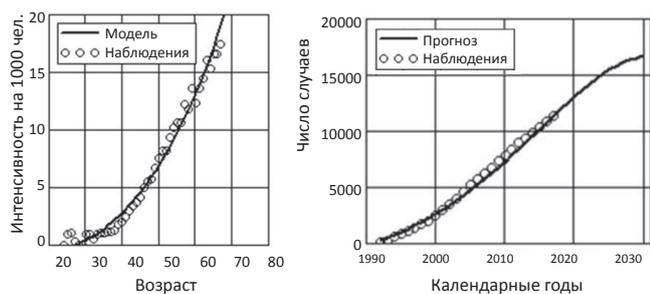


Рис. 7. Интенсивность смертности в зависимости от возраста и динамика кумулятивной смертности от БСК
 Fig. 7. Age-specific mortality rate and dynamics of cumulative mortality from circulatory diseases

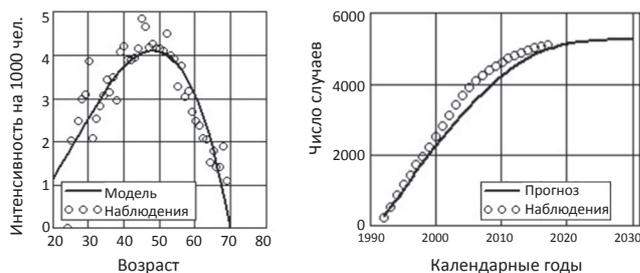


Рис. 8. Интенсивность смертности в зависимости от возраста и динамика кумулятивной смертности от ТО
 Fig. 8. Age-specific mortality rate and dynamics of cumulative mortality from traumas and poisoning

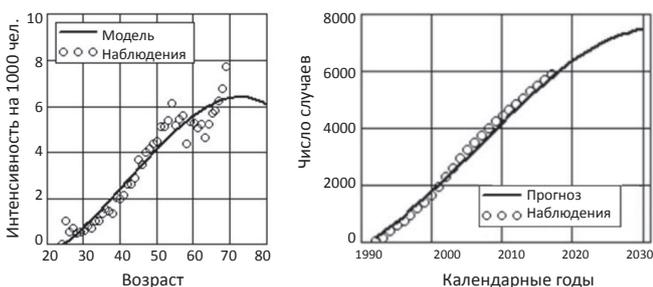


Рис. 9. Интенсивность смертности в зависимости от возраста и динамика кумулятивной смертности от всех причин, кроме ЗНО, ТО и БСК
 Fig. 9. Age-specific mortality rate and dynamics of cumulative mortality from all causes except above mentioned diseases

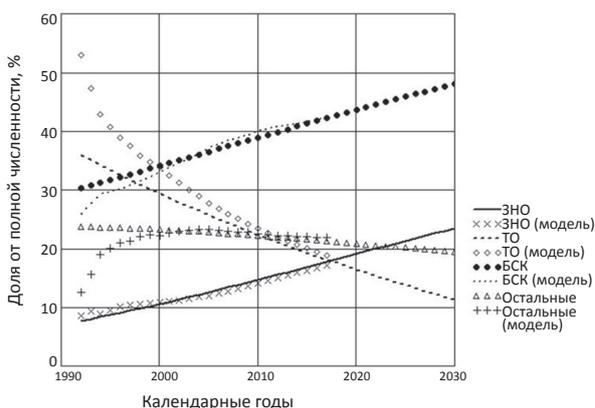


Рис. 10. Динамика структуры смертности ликвидаторов
 Fig. 10. Dynamics of emergency clean-up workers mortality structure

2030 г. 23 %, при этом доля случаев смерти от БСК составит 48 %, а от других причин — 18 %.

Средняя ожидаемая продолжительность предстоящей жизни членов когорты в 2017 г. составляет 11,1 года (средний возраст ликвидаторов в 2017 г. — 62,4 года), тогда прогнозируемая ожидаемая продолжительность жизни ликвидаторов с 2017 г. составит 73,5 года. Ожидаемая продолжительность жизни когорты ликвидаторов с показателями смертности 2017 г. для мужского населения России населения равна 70,4 года. Наблюдаемый эффект увеличения продолжительности жизни может быть обусловлен эффектом «здоровых рабочих», мерами социальной поддержки, включая специализированную диспансеризацию, а также нельзя исключить и влияние естественного отбора.

Проведенное моделирование хорошо описывает результаты наблюдений. В табл. 3 приведены наблюдаемые и модельные числа случаев для рассматриваемых причин смерти за период с 1992 по 2017 гг. Максимальное отличие в числе случаев наблюдается для смерти от ЗНО и не превышает 3 %.

Обсуждение

Анализ и моделирование процессов смертности в когорте ликвидаторов показывают, что модели адекватно описывают процессы смертности за период наблюдения с 1992 по 2017 гг., что дает основания для

надежности прогнозных оценок смертности в предстоящие 10–15 лет. Ожидаемая средняя продолжительность жизни ликвидаторов в рассматриваемой когорте с 2017 г. равна 73,5 года, в то же время ожидаемая средняя продолжительность жизни в этой же когорте, но с российскими возрастными показателями смертности, равна 70,4 года, то есть смертность в когорте ликвидаторов меньше, чем в референсной группе населения РФ.

В соответствии с современными научными представлениями среди наблюдаемого числа смертей в исследуемой когорте ликвидаторов определенную долю составляют случаи, индуцированные облучением. Для приближенной оценки доли радиогенных случаев используем результаты исследований смертности ликвидаторов, зарегистрированных в НРЭР, приведенных в публикациях [7–9], где сделаны оценки радиационных рисков смертности для солидных раков для ЗНО и БСК.

В публикации [7] проведен анализ смертности и дозовой зависимости смертности в когорте ликвидаторов, работавших в зоне облучения в течение года после аварии. Для оценки зависимости риска смерти от дозы облучения использованы непараметрические методы анализа выживаемости с учетом конкуренции рисков смерти. Исследована смертность от ЗНО и БСК в когорте ликвидаторов (период наблюдения 1992–2012 гг.). В анализе использована

Таблица 3

**Модельные и фактические значения
кумулятивного числа случаев
за период 1992–2017 гг.**

Modeling and actual data of cumulative number of cases

Причина смерти	Наблюдения	Моделирование
ЗНО	4621	4765
ТО	5110	5019
БСК	11410	11420
Другие	5910	5819
Все причины смерти	27051	27023

Примечание: ЗНО — злокачественные новообразования; ТО — травмы и отравления; БСК — болезни системы кровообращения

накопленная за 1992–2012 гг. информация о ликвидаторах (мужчинах), работавших в зоне облучения с 26 апреля 1986 по 26 апреля 1987 гг. со средними дозами 0,17 Гр. Угловой коэффициент зависимости доза-эффект, нормированный на дозу 1 Гр, для отношения рисков в линейной модели для раков равен 0,47 (95 % ДП: -0,77; 1,71), для системы кровообращения — 0,22 (95 % ДП: -0,58; 1,02).

В публикации [8] исследуемая когорта практически идентична рассматриваемой когорте с тем же периодом наблюдения (1992–2017 гг.) со средними дозами 0,13 Гр. В рамках линейной модели зависимости смертности от дозы облучения получены статистически значимые оценки коэффициента избыточного относительного риска на единицу дозы (ERR/Gr) для всех солидных раков $ERR/Gr = 0,63$; 95 % ДИ (0,19; 1,11); $p = 0,004$.

В публикации [9] анализ статистических связей доз облучения и структуры причин смерти среди ликвидаторов проведен методами Data Mining, свободными от априорных предположений о вероятностных распределениях доз и диагнозов. Рассмотрены статистические связи смертности с дозой облучения на уровне классов заболеваний, рубрик и отдельных диагнозов. Для анализа использованы таблицы сопряженности случаев смерти, дозы облучения и возраста. Статистически значимый положительный тренд (отношение шансов) по дозе облучения в одинаковых возрастных категориях наблюдается для классов «Злокачественные новообразования» (класс С МКБ-10) и «Болезни системы кровообращения» (класс I).

Приближенное число радиогенных случаев смерти для солидных раков и БСК определим с использованием приведенных значений избыточного относительного риска на 1 Гр (ERR/Gr). Относительный риск за период наблюдения $RR = O/E = 1 + (ERR/Gr) \times d$, где O — наблюдаемое число случаев смерти; E — ожидаемое число при отсутствии облучения; d — средняя доза в когорте. Тогда ожидаемое число случаев равно $E = O / (1 + (ERR/Gr) \times d)$, а разность $O - E$ даст число радиогенных случаев смерти. Для солидных раков число случаев смерти за период наблюдения — 4621, из них вычтем смерти, которые случились во время латентного периода 10 лет (до 1996 г.), — 350 смер-

тей, ERR/Gr в публикации [7] равен 0,47 (доза 0,17 Гр), а в публикации [8] он равен 0,63 (доза 0,13 Гр). Тогда число радиогенных случаев смерти от солидных раков будет: $4271 - 4271 / (1 + 0,47 \times 0,17) = 316$ и $4271 - 4271 / (1 + 0,63 \times 0,13) = 323$, что практически одинаково в обоих случаях. Если использовать прогнозные оценки числа случаев до 2030 г. при условии, что ERR/Gr останется прежним, получим значения 544 (7,4 % из общего числа смертей от ЗНО) и 556 (7,6 %) случаев соответственно.

Условно принимая, что латентный период для БСК также равен 10 лет, получим к 2017 г. 372 случая от радиогенных БСК и прогноз 603 случаев к 2030 г. Т.е. прогнозируемая доля радиогенных случаев смерти от БСК к 2030 г. будет составлять 3,7 % из общего прогнозируемого числа смертей от БСК. Таким образом, прогнозируемая общая доля радиогенных случаев смерти (от ЗНО и БСК суммарно) к 2030 г. будет составлять около 3,1 % от общего числа прогнозируемых случаев смерти.

Следует отметить, что в представленном в данной статье анализе не учтены некоторые факторы, которые могут повлиять на точность результатов. Не учтен временной тренд показателей интенсивности процессов смертности, а использованы результаты наблюдений за весь период с 1992 по 2017 гг. Тем не менее, использованный подход моделирует динамику возрастной структуры когорты с достаточной точностью.

На точность оценки ожидаемой продолжительности жизни и прогноза динамики когорты может повлиять малое количество случаев для ликвидаторов возрастом свыше 75 лет и связанная с этим большая девиация в интенсивности смертности. Кроме того в анализе не учтена информация о ликвидаторах, наблюдение за которыми было потеряно (неявка на диспансеризации, миграция), что может также повлиять на точность проведенного анализа.

Выводы

1. В структуре смертности в 2017 г. доминантной является смертность от БСК (42 %), от ЗНО (18 %), от ТО (18 %) и от всех причин, кроме перечисленных (22 %). Согласно прогнозу на 2030 г., доля смертей будет расти от БСК (48 %), от ЗНО (24 %), уменьшаться — от ТО (11 %) и других причин (18 %).

2. Средняя продолжительность жизни ликвидаторов, имеющих в регистре статус «жив» в 2017 г., равна 73,5 года, тогда как эта же величина, рассчитанная с показателями смертности мужского населения РФ, равна 70,4 года. Эффект увеличения продолжительности жизни в когорте ликвидаторов можно объяснить эффектом «здоровых рабочих», мерами социальной поддержки, включая специализированную диспансеризацию и выбыванием со временем из замкнутой когорты ликвидаторов с повышенной уязвимостью здоровья.

3. Прогнозируемая общая доля радиогенных случаев смерти (от ЗНО и БСК суммарно) к 2030 г. будет составлять около 3,1 % от общего числа прогнозируемых случаев смерти.

Prognostic Analysis of Mortality in the Cohort of the Chernobyl Cleanup Workers

A.I. Gorski, M.A. Maksoutov, K.A. Tumanov, E.V. Kochergina, N.S. Zelenskaya, V.K. Ivanov

A.F. Tsyb Medical Radiological Research Centre, Obninsk, Russia

ABSTRACT

Purpose: Analysis and prognosis of mortality rate, specific causes of death and mortality structure in the male cohort of the Chernobyl cleanup workers monitored from 1992 over 2017.

Materials and methods: Analysis and prognosis of mortality among the Chernobyl cleanup workers for the follow up period 1992–2017 were based on personal death records stored at the National Radiation Epidemiological Registry (NRER). The workers entered the exclusion zone in 1986 and in 1987, who had documented dose records were included in the monitoring cohort. In 1992 the cohort size was 72432 persons, average radiation dose was 130.8 mGy. For the period of the cohort monitoring 27051 cleanup workers died with the following causes of death: malignant neoplasms — 4621 cases, circulatory diseases — 11410 cases, traumas and poisoning — 5110 cases, other — 5910. To prognose mortality and mortality structure data on age-specific intensity of partial mortality and total mortality during the monitoring period were used.

Results: The predicted size of the cohort will be 22,000 persons in 2030. Mortality structure in 2017: malignant neoplasms — 17 %; circulatory diseases — 42 %; traumas and poisoning — 19 %, other — 22 %. The mortality structure in 2030 will be: malignant neoplasms — 24 %; circulatory diseases — 49 %; traumas and poisoning — 11 %, other — 16 %. Cleanup workers' the average time left to live estimated in 2017 was 11.1 years (their average age in 2017 was 62.4 years), it means that their average life expectancy will be 73.5 years. Average life expectancy of Russian males is 70.4 years. Increased life span of the cleanup workers can be due to their good health, social support including regular special medical examination, the effect of the natural selection cannot be excluded as well.

Conclusion: Results of the study can serve as example of organization of high effective specialized medical examination of the Chernobyl cleanup workers. The research outcomes will be useful for analysis of mortality among members of a closed population following exposure to hazardous technogenic factors.

Key words: Chernobyl cleanup workers, prognosis of mortality, National Radiation Epidemiological Registry, non-parametric method of analysis, intensity of mortality, mortality risks concurrence, mortality structure, malignant neoplasms, circulatory diseases, traumas and poisoning, average lifespan

For citation: Gorski AI, Maksoutov MA, Tumanov KA, Kochergina EV, Zelenskaya NS, Ivanov VK. Prognostic Analysis of Mortality in the Cohort of the Chernobyl Cleanup Workers. Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;65(5):35-41 (In Russ.).

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-5-35-41

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Andersen PK, Borgan O, Gill RD, Keiding N. Statistical models based on counting processes. New York: Springer-Verlag; 1993. 784 p.
- Hougaard P. Analysis of multivariate survival data. New York: Springer-Verlag; 2000. 542 p.
- Hougaard P. Multi-state models: a review. Lifetime Data Anal. 1999;5(3):239-64.
- Commenges D. Multi-state models in epidemiology. Lifetime Data Anal. 1999;5(4):315-27.
- Levenberg K. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. Quart. Appl. Math. 1944;2(2):164-8.
- Marquardt D. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. J Soc Indust Appl Math. 1963;11(2):431-41.
- Горский АИ, Максютков МА, Туманов КА, Щукина НВ, Чекин СЮ, Иванов ВК. Непараметрический анализ радиационных рисков смертности среди ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС. Радиационная биология. Радиоэкология. 2016;56(2):138-48. [Gorski AI, Maksoutov MA, Tumanov KA, Shchukina NV, Chekin SYu, Ivanov VK. Non-parametric analysis of radiation risks of mortality among Chernobyl clean-up workers. Radiation Biology. Radioecology. 2016;56(2):138-48. (In Russ.)].
- Иванов ВК, Карпенко СВ, Кашеев ВВ, Чекин СЮ, Максютков МА, Туманов КА и др. Радиационные риски российских участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС за период 1992–2017 гг. Часть II: смертность от солидных раков. Радиация и риск. 2020;29(1):18-31. [Ivanov VK, Karpenko SV, Kashcheev VV, Chekin SYu, Maksoutov MA, Tumanov KA, et al. Radiation risks of Russian liquidators of the Chernobyl accident for the period 1992–2017. Part II: Solid cancer mortality. Radiation and Risk. 2020;29(1):18-31. (In Russ.)].
- Горский АИ, Максютков МА, Туманов КА, Кочергина ЕВ, Корело АМ. Статистические связи смертности ликвидаторов с дозой облучения. Радиация и риск. 2018;27(1):22-32. [Gorski AI, Maksoutov MA, Tumanov KA, Kochergina EV, Korelo AM. Association rules for discovery relationship between mortality among Chernobyl liquidators and radiation dose. Radiation and Risk. 2018;27(1):22-32. (In Russ.)].

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Financing. The study had no sponsorship.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

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

Поступила: 01.10.2020. **Принята к публикации:** 11.11.2020.

Article received: 01.10.2020. **Accepted for publication:** 11.11.2020.

Information about the authors:

Gorski A.I. <https://orcid.org/0000-0003-0272-0928>.
 Maksoutov M.A. <https://orcid.org/0000-0001-7229-0092>.
 Tumanov K.A. <https://orcid.org/0000-0003-0722-5408>.
 Kochergina E.V. <https://orcid.org/0000-0003-4925-9980>.
 Zelenskaya N.S. <https://orcid.org/0000-0003-0914-5401>.
 Ivanov V.K. <https://orcid.org/0000-0003-1372-0018>.