

УДК 614.8, 621.039.58

О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ТЯЖЕСТИ ПОРАЖЕНИЙ ПРИ РАДИАЦИОННЫХ АВАРИЯХ И СПОСОБНОСТИ ЧЕЛОВЕКА ИГНОРИРОВАТЬ РАДИАЦИОННЫЙ РИСК

Б. А. Бенецкий

Статья посвящена авариям на ядерных реакторах, радиационным поражениям при авариях и так называемому “человеческому фактору”. Приведено уравнение баланса дозовых характеристик в теле человека и в окружающей среде. Сделана попытка количественной оценки относительной изменчивости способности человека к игнорированию радиационного риска.

Ключевые слова: радиация, риски, радиационные аварии, защита.

Для планирования мероприятий по оказанию помощи и охране жизни людей при ликвидации тяжелых радиационных аварий может оказаться недостаточным подход, основанный на использовании только средних показателей радиационных поражений. Количественный анализ рисков и в особенности управления рисками требуют знания распределений количественных мер (доз) поражающих факторов. Согласно существующим данным наблюдений при аварийных облучениях и при профессиональном облучении в отсутствие “управления дозозатратами” распределение индивидуальных доз D хорошо описывается логнормальным распределением:

$$dN/dD = \frac{\exp[-(\ln D - m)^2/2\sigma^2]}{\sqrt{2\pi}\sigma D}. \quad (1)$$

Его параметры связаны с наиболее вероятной дозой (положение максимума распределения) D_{\max} и средней дозой $\langle D \rangle$ соотношениями

$$\ln D_{\max} = m - \sigma^2,$$

$$\ln \langle D \rangle = m + \sigma^2/2. \quad (2)$$

Такое распределение наблюдалось в Чернобыле у ликвидаторов и у свидетелей аварии, а также при аварии на атомной подводной лодке за 25 лет до Чернобыля [1]. В апостериорном исследовании, проведенном совместно сотрудниками ЧАЭС и ИБФ Минздрава РФ, была осуществлена проверка правильности статистических данных о полученных в Чернобыле в период ликвидации индивидуальных дозах внешнего облучения. Критерием истины служило сравнение распределений доз, следующих из данных официальной статистики, с логарифмическим нормальным распределением. По мнению авторов цитируемой работы “распределения (анализируемых доз) можно разбить на две группы”. “В первую входят все распределения (по данным) Минэнерго, в которых четко проявляется логнормальный, или, говоря более обобщенно, гладкий, одномодальный характер распределения индивидуальных доз внешнего облучения. Во вторую группу входят все распределения Минобороны и Минсредмаша, которые не имеют ничего общего с логнормальным законом”. Отмечаются отклонения от логнормального распределения “в виде пиков, соответствующих “круглым” значениям доз” [2], такие результаты не анализировались. В результате обработки данных, не вызвавших у авторов цитируемой работы сомнений, было установлено: несмотря на то, что средние индивидуальные дозы в различных выборках (по коллективам ликвидаторов из различных организаций) отличаются более чем в 10^3 раз, дисперсия логарифма индивидуальной дозы фактически не зависит от среднего значения дозы и объема выборки. Такое свойство наблюдаемых распределений логарифмов доз относит их к классу так называемых гомоскедастичных или равноизменчивых распределений случайных величин. Таким образом, распределение меры воздействия поражающего фактора при радиационных авариях (дозы) обладает очень четкими особенностями: самим типом распределения и свойством гомоскедастичности её логарифма. Имеет распространение и более общее утверждение о том, что “логнормальное распределение является удовлетворительной моделью распределения экстремальных природных и техногенных событий по амплитуде их воздействия” на человека [3]. Можно предположить, что имеется некая объективная, общая для всех или многих аварийных ситуаций причина, приводящая к формированию логнормального распределения тяжести поражений. Такой подход был предложен нами ранее [4, 5] и основан он на учете “человеческого фактора”. В частности – воздействия радиационного стресса (или стресса иной природы) на интеллектуальные и психофизиологические характеристики человека. При изучении особенностей формирования тревожности у моряков в условиях радиационной аварии на подводной лодке (п. 1.3. в [6]) отмечалось, что 65.6% из них опасались угрозы жизни, 20% – отрицательного влияния на потенцию

и репродуктивную функцию, 14.4% – развития нервно-психических расстройств. В отечественной радиационной неврологии имеет место утверждение: “практика показывает, что в диагностике, расшифровке патогенеза и в терапии ряда синдромов острой лучевой болезни (ОЛБ) и ее последствий немаловажная роль принадлежит невропатологу” [7]. Формирование невропатологических синдромов происходит во время облучения. В период адаптации у одних образуется известное пренебрежение риском облучения, у других – повышенная настороженность, у третьих – страх, понижающий способность рационального мышления. Все эти, порой противоположные, причины должны приводить к росту интенсивности накопления радиационных поражений при увеличении дозы. В самой примитивной форме это может быть выражено следующим образом: при равных условиях облучения мощность индивидуальной дозы растет с её накоплением

$$\dot{D} = \alpha \cdot D \quad (3)$$

или

$$dD/D = \alpha dt. \quad (4)$$

Назовем α “коэффициентом игнорирования радиационного риска” (игнорирования, а не пренебрежения, т.к. причины могут быть разные). Легко понять его физический смысл: **коэффициент игнорирования радиационного риска α численно равен относительному увеличению индивидуальной дозы за единицу времени при неизменных условиях внешнего облучения.**

Рассмотрим модель облучения, в которой изменение условий облучения во времени определяется временной зависимостью относительной (относительно начального значения) мощности дозы в окружающей среде (амбиентной дозы) $D_a f(t)$

$$f(t) = D_a(t)/D_0. \quad (5)$$

Изменчивость этой дозы при перемещении в пространстве учитывается значением коэффициента игнорирования радиационного риска (данный индивид пренебрегает различием или, наоборот, избегает пространств с высокими относительными мощностями амбиентных доз). Последнее относится не только к исполнителям работ, но и к руководителям, что многократно усиливает влияние этого фактора. Тогда уравнение баланса, учитывающее влияние упомянутых причин, должно выглядеть как

$$dD/D = \alpha \cdot f(t) dt. \quad (6)$$

Нулевым приближением уравнения (6) является уравнение (4), в котором функция временной зависимости относительной мощности амбиентной дозы заменена единицей.

В левой части уравнения (6) выражение dD/D – относительное приращение индивидуальной дозы в биоткани за время dt , в правой $f(t)dt$ – относительное приращение AMBIENTНОЙ дозы. Если принять приближения модели, приведенная выше формулировка “физического смысла” коэффициента игнорирования радиационного риска должна быть дополнена следующим образом: **коэффициент игнорирования радиационного риска α численно равен также отношению относительного увеличения индивидуальной дозы к относительному увеличению AMBIENTНОЙ дозы за единицу времени.** Т.е. в рассматриваемой нами модели коэффициент α определяет баланс между индивидуальной и AMBIENTНОЙ дозами, уравнение (6) может быть названо уравнением баланса и его решение имеет вид

$$D = D_0 \exp(\alpha \times \Delta T_{\text{eff}}), \quad (7)$$

где эффективная продолжительность облучения ΔT_{eff} равна

$$\Delta T_{\text{eff}} = \int_{t_a}^t f(t) dt. \quad (8)$$

В частном случае, когда в результате, например, естественной дезактивации после выброса или взрыва мощность AMBIENTНОЙ дозы (или концентрации источников радиации в облаке) уменьшается по экспоненциальному закону $f(t) = \exp(-t/\tau)$, эффективная продолжительность облучения равна

$$\Delta T_{\text{eff}} = \tau \times (\exp(-t_a/\tau) - \exp(-t/\tau)), \quad (9)$$

а в случае, когда $t_a < t \ll \tau$, она равна реальной продолжительности облучения

$$\Delta T_{\text{eff}} = \Delta T = t - t_a. \quad (10)$$

Важно отметить, что последнее справедливо и в случае нормированной на единицу суперпозиции экспонент $f(t) = \sum a_i \exp(-t/\tau_i)$, если для каждой выполняется условие $t_a < t \ll t_i$.

В правой части решения (7) D_0 – доза, накопленная перед аварией, величина, как правило, малая по сравнению с аварийными дозами и контролируемая при штатной ситуации. Будем приближенно считать её одинаковой для всех, подвергшихся аварийному облучению. Коэффициент α – случайная величина, характеризующая влияние “человеческого фактора”. Эффективная продолжительность облучения ΔT_{eff} – случайная величина, в ряде практически важных случаев имеющая малый статистический разброс

по сравнению с её средним значением. К примеру, при аварии на подводной лодке или при работе саперного батальона, передислоцированного в зону повышенного облучения за несколько часов и проработавшего в ней два месяца. Будем считать эту величину также постоянной. Тогда, если предположить, что распределение коэффициента пренебрежения риском $dN/d\alpha$ нормальное, со средним $\bar{\alpha}$ и дисперсией σ_α , то распределение аварийных доз по правилу преобразования распределений $dN/dD = dN/d\alpha \times d\alpha/dD$ примет форму нормального логарифмического распределения (1) с параметрами:

$$m = \ln D_0 + \bar{\alpha} \Delta T_{\text{эфф}} \text{ и } \sigma = \sigma_\alpha \Delta T_{\text{эфф}}. \quad (11)$$

Свойство гомоскедастичности при этом оказывается естественным следствием полученных результатов. Действительно, из (1) непосредственно следует гауссово распределение логарифмов доз, равное

$$dN/d(\ln D) = \frac{\exp[-(\ln D - m)^2/2\sigma^2]}{\sqrt{2\pi}\sigma} \quad (12)$$

со следующими из решения уравнения (7) параметрами (11). Если выборка пострадавших представляет собой экипаж корабля, личный состав части или подразделения (см. выше пример саперного батальона), то для этих случаев эффективная продолжительность облучения $\Delta T_{\text{эфф}}$ (как и реальная продолжительность ΔT) – величины для различных индивидуумов примерно равные. Люди попадают в зону облучения и покидают ее организованно. Тогда дисперсия распределения логарифма аварийной дозы в (12) почти постоянна, равна

$$\sigma = \sigma_\alpha \Delta T_{\text{эфф}} \approx \text{const} \quad (13)$$

и пропорциональна дисперсии коэффициента игнорирования радиационного риска σ_α , т.е. является характеристикой распределения свойств человека. Можно привести другой случай выполнения условия (13) – мощного импульсного облучения (в результате, например, ядерного взрыва на полигоне), когда реальный интервал времени ΔT для различных групп и индивидуумов может отличаться достаточно сильно, а эффективная длительность облучения $\Delta T_{\text{эфф}}$ будет определяться небольшим интервалом времени после взрыва.

Сравним полученные выводы с одним из редких случаев аварий, когда хорошо и надежно известны медицинские данные (до и после) пострадавших, их индивидуальные показатели (в том числе “инструментально контролируемые”) радиационного воздействия, история аварии и ход течения последующей острой лучевой болезни (ОЛБ). В

результате падения давления в первом контуре реактора подводной лодки возникла необходимость аварийного пролива (прокачки) активной зоны реактора. В аварийных условиях была смонтирована нештатная система охлаждения и использован бортовой запас пресной воды. В ходе аварийно-спасательных работ дважды возникал пожар в реакторном отсеке, под ним образовалась паровая подушка. Спектр индивидуальных дозовых характеристик экипажа оказался весьма широк, спектр последствий – также. Лучевая реакция и облучение без клинических проявлений ОЛБ наблюдались у 108 человек, ОЛБ-1 (первой степени) – у 14, ОЛБ-2 – у 4, ОЛБ-3 – у 4, ОЛБ-4 – у 8. Шесть человек от полученных радиационных поражений скончались. Доминирующим фактором сочетанного радиационного поражения оказалось воздействие гамма-излучения на костный мозг, отягощенное субтотальным бета-ожогом [6]. Наиболее точными оказались данные по накоплению йода-131 в щитовидных железах пострадавших. Они представлены на рис. 1, распределение индивидуальных гамма-доз – на рис. 2. Значения данных наблюдений объединены кривыми, проведенными по стандартной программе “Sigma Plot 9.0”. Кривые без точек – по формуле (1) с учетом соотношений (2) и конкретных значений параметров: $m = 3.33, \sigma = 0.85$ для накопления йода-131 и $m = 4.01, \sigma = 0.74$ для гамма-доз, соответственно. Результаты наблюдений вследствие малой величины частной выборки суммированы по группам. Из-за отсутствия данных по погибшим и тяжело пострадавшим частная выборка составляет 122 человека, что соответствует ограничению области наблюдений до двух средних доз по гамма и 4.5 средних активностей инкорпорированного йода. Учитывая эти ограничения, данные наблюдений находятся, по-видимому, во вполне удовлетворительном согласии с логнормальным законом распределения.

В рамках рассматриваемой модели влияние “человеческого фактора” характеризуют значения средней величины коэффициента игнорирования радиационного риска $\bar{\alpha}$ и его дисперсии σ_{α} (соотношения (11), (13)). Однако, в отсутствие данных о временной зависимости мощности амбиентной дозы при развитии аварии нельзя определить величину эффективной продолжительности облучения ΔT_{eff} . Можно, однако, исключить её из выражений (11) и определить отношение:

$$\sigma_{\alpha}/\bar{\alpha} = \sigma/(m - \ln D_0), \quad (14)$$

в правой части которого D_0 – доза, накопленная в период адаптации (как сказано выше, она существенно меньше аварийных доз). При обработке данных мы считали её величиной постоянной и равной 8 рентгенам, т.е. примерно одной трети порога проявления детерминированных последствий облучения. На рис. 2 эта величина отмечена

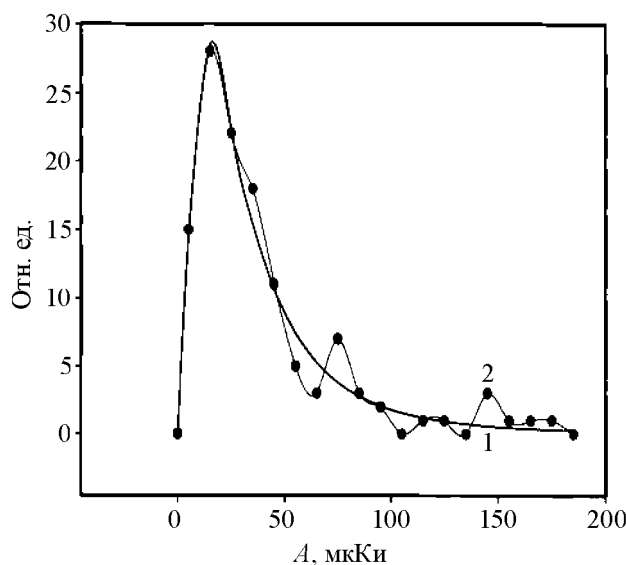


Рис. 1: Распределение активности радиойода в щитовидных железах у 122 членов экипажа подводной лодки после аварии ЯЭУ. По оси абсцисс – активность йода-131, отнесенная к первому дню после аварии. По оси ординат – количество облученных на интервал активности ΔN . Кривая 1 – расчет по формуле (1), кривая 2 – данные наблюдений.

немонотонностью кривой 1, объединяющей точки данных наблюдений. Из данных о гамма-дозах следует оценка: $\sigma_\alpha/\bar{\alpha} = 0.38$; из результатов по накоплению радиойода – $\sigma_\alpha/\bar{\alpha} = 0.46$. Различие последнего с предыдущим случаем состоит в том, что до аварии накапливалась гамма-доза, но не инкорпорировался радиойод, поэтому было произвольно предположено равенство отношений начальных доз и активностей к их средним значениям. При малой статистике, различии типов поражений, инструментальных средств и методов и даже несовпадении времен и мест измерений (активность йода измерялась в клинических условиях после эвакуации пострадавших) 20%-ное расхождение численных коэффициентов в вышеприведенных соотношениях не представляется существенным. Рассматривая эти результаты как оценки, проведенные двумя способами, можно сделать вывод, что **отношение дисперсии коэффициента игнорирования радиационного риска к его среднему значению равно**

$$\sigma_\alpha/\bar{\alpha} = (0.42 \pm 0.04), \quad (15)$$

что служит прямым указанием на большое влияние различий индивидуальных психофизических свойств человека, даже в пределах небольших элит-

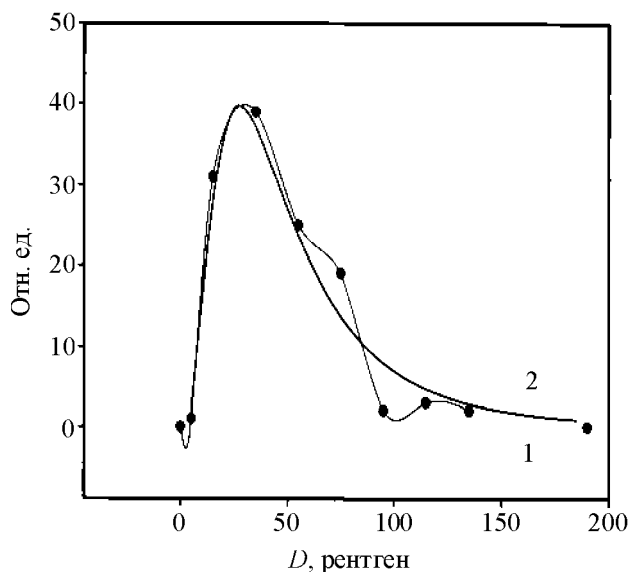


Рис. 2: Распределение доз гамма-излучения у 122 членов экипажа подводной лодки после аварии ЯЭУ. По оси абсцисс – величина дозы. По оси ординат – количество облученных на интервал доз. Кривая 2 – расчет по формуле (1), кривая 1 – данные наблюдений.

ных профессиональных коллективов, на формирование радиационных поражений при авариях.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *За четверть века до Чернобыля*. Публикация в газете “Правда”, см. раздел 1.5. в монографии [7].
- [2] В. Н. Васильченко, А. В. Носовский и др. в сб. *Радиационные поражения и перспективы развития средств индивидуальной защиты от ионизирующих излучений*. Под ред. Филатова В.Н., Бенецкого Б.А., Гогина Е.Е. (М., ЦНИИТЭИЛЕГ-ПРОМ, 1994), с. 26.
- [3] В. Г. Семенов, Н. М. Соболевский, Препринт ИЯИ 1049/2000 (Москва, ИЯИ, 2000).
- [4] Б. А. Бенецкий, *О распределении индивидуальных доз и тяжести поражений при радиационных авариях*. Тезисы докладов 59 Международного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра ЯДРО 2009 (СПб., физфак СПбУ, 2009), с. 304.

- [5] Б. А. Бенецкий, *Влияние человеческого фактора на распределение индивидуальных доз и тяжести поражений при радиационных авариях*. Материалы XXII Международной научно-практической конференции “Актуальные проблемы пожарной безопасности”, Москва, 2010, ч. 2 (М., ВНИИПО, 2010), с. 35.
- [6] Е. Е. Гогин, В. М. Емельяненко, Б. А. Бенецкий, В. Н. Филатов, *Сочетанные радиационные поражения* (М., Известия, 2000).
- [7] В. С. Лобзин, в сб. *Радиационные поражения и перспективы развития средств индивидуальной защиты от ионизирующих излучений*. Под ред. Бенецкого Б.А., Гогина Е.Е., Филатова В.Н. (М., ЦНИИТЭИЛЕГПРОМ, 1992), с. 21.

Поступила в редакцию 27 января 2011 г.