

ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СТРАТЕГИЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ С УТЕЧКОЙ РАДИАЦИИ¹

УДК 351.862.2:614.876

Николай Петрович Тихомиров,
д.э.н., заведующий кафедрой математических методов в экономике,
ФГБОУ ВО «Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова»,
Тел.: (499) 237 94 09
Эл. почта: nik.tikhomirov.46@mail.ru

Дмитрий Викторович Арон,
научный сотрудник, ФГБУН Институт проблем безопасного развития
атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН),
Тел.: (499) 955 23 50
Эл. почта: aron@ibrae.ac.ru

Павел Васильевич Ивандиков,
старший научный сотрудник, кандидат технических наук, ФГБУН Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН),
Тел.: (499) 256 61 64
Эл. почта: ivandekof@mail.ru

Рассмотрены методы оценки дозовых границ экономически целесообразного применения мер вмешательства при чрезвычайных ситуациях с утечкой радиации и оптимальных по критерию минимума издержек вмешательства значений остаточных доз облучения. Получены решения этих задач для таких мер вмешательства как дезактивация территории и временное отселение жителей и оценена обоснованность их применения при ликвидации последствий аварии на АЭС «Фукусима-1».

Ключевые слова: доза облучения, радиационный риск, вмешательство, затраты, выгоды, издержки, эффективность, оптимизация.

Nikolay P. Tikhomirov,
Head of department "Mathematical methods in economics", Dr.Sc. in Economics, Plekhanov Russian University of Economics
Tel.: (499) 237 94 09
E-mail: nik.tikhomirov.46@mail.ru,

Dmitry V. Aron,
Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russia Academy of Sciences (IBRAE)
Tel.: (499) 955 23 50
E-mail: aron@ibrae.ac.ru

Pavel V. Ivandikov,
Chief researcher, Phd. in Technics, Nuclear Safety Institute of the Russia Academy of Sciences (IBRAE)
Tel.: (499) 256 61 64
E-mail: ivandekof@mail.ru

ECONOMIC JUSTIFICATION AND OPTIMIZATION OF STRATEGIES ENSURING SAFETY IN EMERGENCIES WITH RADIATION LEAKS

The methods of estimation of dose boundaries of economically expedient use of interventions in emergencies with radiation leaks and optimal residual radiation doses by criterion of minimum of intervention costs are considered. The solutions of these problems for such interventions as territory deactivation and temporary resettlement of residents are obtained. The validity of their application in the elimination of the consequences of the disaster at Fukushima-1 Nuclear Power Plant is evaluated.

Keywords: radiation dose, radiation risk, intervention, costs, benefits, expenses, efficiency, optimization.

1. Введение

Существование реальных возможностей проявления инцидентов, сопровождающихся радиоактивным загрязнением значительных территорий, наиболее серьезными среди которых являются аварии на АЭС и террористические акты с использованием радиоактивных изотопов, обуславливает необходимость разработки эффективных стратегий (мер вмешательства), смягчающих их негативные экономические и социальные последствия, связанные с ограничением хозяйственной деятельности и увеличением рисков потери здоровья и жизни населения. Как показали результаты анализа последствий аварий на Чернобыльской АЭС в 1986 г., АЭС «Фукусима-1» в 2011 г. и гипотетических сценариев с подрывом «грязных» ядерных зарядов [1–5], основные проблемы при этом возникают при обосновании уровней остаточных после вмешательства эффективных доз облучения, позволяющих вести жизнедеятельность на загрязненной территории, хотя бы в ограниченном объеме.

Международная комиссия по радиационной защите (МКРЗ) при ликвидации последствий аварийных ситуаций с утечкой радиации рекомендует устанавливать индивидуальные остаточные эффективные дозы облучения на настолько низком уровне, насколько это разумно достижимо с учетом социально-экономических факторов. Вместе с тем, при исходных дозах облучения, не превышающих 20 мЗв/год, наиболее затратные меры вмешательства, связанные, например, с дезактивацией территории, остановкой производства и массовым отселением жителей, признаются чрезмерными [6,7]. При таких дозах для снижения радиационных рисков предлагается использовать менее затратные индивидуальные средства защиты, в крайних случаях – временное отселение наиболее чувствительных к радиации групп населения (детей и беременных женщин).

По мнению специалистов МКРЗ в качестве верхнего предела остаточных доз облучения целесообразно установить величину в 100 мЗв/год. При этом органы управления на местах могут принимать в качестве такого предела и меньшие значения доз. Такие рубежи обозначены термином «референтный уровень» [6,7]. Его значение в об-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского гуманитарного научного фонда (РГНФ), проект № 15-02-00412а.

щем случае отражает отношение населения и системы управления к риску, наличие ресурсов для вмешательства и другие факторы. Если меры вмешательства не способны обеспечить снижение исходной дозы облучения ниже референтного уровня, то рекомендуется обязательное отселение населения и прекращение деятельности на загрязненной территории на длительные сроки, за исключением ситуаций, когда такого облучения избежать нельзя, а также связанных со спасением жизни людей или предотвращением более серьезной катастрофы. В таких случаях для ограниченного числа лиц (профессионалов, ликвидаторов последствий аварий) допускаются дозы облучения, выше 100 мЗв/год. Таким образом, можно заключить, что нижний рубеж дозы в 20 мЗв/год ограничивает чрезмерные расходы на вмешательство, а верхний (100 мЗв/год) или другие референтные уровни – избыточные риски для населения.

При обосновании остаточных после вмешательства доз МКРЗ предлагает использовать принципы социально-экономической целесообразности и оптимизации [6,7]. Как было отмечено выше с позиций социальной целесообразности исходные дозы аварийного облучения должны быть снижены до минимально возможного уровня. С позиции экономики вмешательство можно считать обоснованным, если обусловленное его применением снижение дозы облучения с исходного уровня D (мЗв/год) до остаточного уровня D_R (мЗв/год), $D \geq D_R$, характеризуется большими «выгодами» по сравнению с затратами на его осуществление.

По поводу принципа оптимизации МКРЗ высказывается менее определенно. В регламентирующих документах этой организации уровни наиболее «выгодных» остаточных после вмешательства доз предлагаются определять в ходе решения задачи оптимизации защиты с учетом национальных и региональных особенностей и приоритетов в сфере радиационной безопасности, принимая во внимание, насколько это возможно, международные рекомендации

и опыт «хорошей практики». При этом оговаривается, что «оптимизация защиты не есть минимизация дозы», а поиск ее оценки, которая бы «тщательно сбалансировала вред от облучения и ресурсы, необходимые для защиты облучаемых индивидумов» [6,7].

В целом такие рекомендации и предложения имеют достаточно общий характер и не позволяют однозначно подойти к решению каждого из возможных вариантов задач обоснования целесообразности и оптимизации радиационной защиты по уровню остаточной дозы. В частности, в научной литературе нет ясности по поводу выбора критерия оптимизации, среди специалистов существуют определенные разногласия по методологии оценки радиационного риска и обусловленных им потерь здоровья и жизни населения, затрат на рискоснижающие мероприятия, выгод от их применения.

В этой связи определенную актуальность представляют исследования, посвященные обоснованию и совершенствованию возможных подходов к решению таких задач при допустимых предположениях относительно содержания и взаимосвязей затрат и выгод, связанных с вмешательством. В данной работе рассмотрены особенности таких подходов, базирующихся на сопоставлении среднелюдских оценок выгод и затрат, зависящих от предотвращенной вмешательством дозы облучения, и методах безусловной оптимизации его издержек по уровню остаточной дозы на примере дезактивации и временного отселения жителей загрязненной территории.

2. Экономическое обоснование и оптимизация дезактивации как меры вмешательства

Дезактивация загрязненной территории без отселения жителей обычно рекомендуется в ситуациях с относительно невысоким начальным уровнем дозы облучения D , превышающем для долгоживущих радионуклидов уровень в 20 мЗв/год, при котором меры, связанные с отселением, представляются значительно более затратными. Без ограничения общности предположим, что доза облу-

чения D обусловлена воздействием одного радионуклида и равномерно распределена по территории, дезактивация которой не нарушает нормальный режим жизнедеятельности, сроки ее относительно малы, а радиационными рисками в период ее осуществления можно пренебречь. Для упрощения выкладок выгоды, затраты и издержки дезактивации будем оценивать в расчете на одного усредненного индивидуума.

Согласно предположениям, обоснованным в работах [8,9,10], среднелюдские выгоды от дезактивации можно оценить по стоимости предотвращенной накопленной дозы облучения за период жизни индивидуума на загрязненной территории на основе следующего выражения:

$$Q^+(D, D_R) = \lambda \cdot \psi(D - D_R), \quad (1)$$

а затраты на дезактивацию – с учетом их среднелюдской величины и кратности снижения дозы как

$$Q^-(D, D_R) = c_e \cdot \ln \frac{D}{D_R} = c_e \cdot \ln f, \quad (2)$$

где $Q^+(D, D_R)$ и $Q^-(D, D_R)$ – выгоды и затраты на дезактивацию соответственно, зависящие от уровня исходной и остаточной доз облучения; λ – цена единицы эффективной дозы облучения, (руб., \$/Зв); ψ – коэффициент накопления дозы индивидуумом при проживании на загрязненной территории, измеряемый в годах; $f = \frac{D}{D_R}$ – кратность дезактивации; c_e – среднелюдские затраты на дезактивацию с кратностью $f = e$, (руб., \$).

С учетом выражений (1) и (2) условие экономической целесообразности дезактивации приобретает следующий вид:

$$\lambda \cdot \psi(D - D_R) - c_e \cdot \ln \frac{D}{D_R} \geq 0, \quad (3)$$

Принимая во внимание, что $\frac{D}{D_R} = f$, на основе выражения (3) несложно получить оценки нижних границ исходной и остаточной доз, при превышении которых дезактивация становится эффективной мерой вмешательства:

$$D \geq \frac{c_e}{\lambda \psi} \cdot \frac{f}{f-1} \cdot \ln f, \quad (4)$$

$$D_R \geq \frac{c_e}{\lambda \psi} \cdot \frac{1}{f-1} \cdot \ln f, \quad (5)$$

При получении количественных значений граничных доз будем использовать следующие данные. В предположении, что коллективная доза облучения в 1 Зв приводит к потере 1 года жизни, в качестве показателя λ МКРЗ рекомендует принять величину среднедушевого чистого дохода (СЧД) страны [6,11]. Для России на 2014 г. значение λ может быть приблизительно оценено в \$15 тысяч.

Значение коэффициента ψ зависит от скорости распада загрязнителя в естественной среде. Можно показать, что при снижении дозы по экспоненциальному закону

$$D(t) = D \exp(-\mu t),$$

величина коэффициента накопления дозы за L лет определяется следующим выражением:

$$\psi(\mu, L) = \frac{1 - \exp(-\mu L)}{1 - \exp(-\mu)}, \quad (6)$$

где μ – скорость снижения дозы вследствие самораспада радионуклида и воздействия природных факторов.

Например, для радионуклида ^{137}Cs скорость снижения дозы можно принять равной (0,06–0,07)/год (0,023-скорость самораспада и остатальное за счет его миграции в естественной среде). В этом случае при жизни на загрязненной ^{137}Cs территории в течение 25 лет значение ψ составит 12–13 лет.

Среднедушевые затраты на дезактивацию с различной кратностью очистки могут быть оценены на основе нормативов стоимости ее работ, планировочной структуры пострадавшей территории, плотности населения. Согласно имеющимся данным [9,10,12,13], для крупного российского города их величина при кратности $f=e$ составляет примерно \$4 тыс.

Подставив в правые части выражений (4) и (5) приведенные выше значения параметров, например, для двукратной дезактивации территории при загрязнении ее ^{137}Cs ,

получим, что при $\psi = 12$ лет нижняя дозовая граница исходного облучения D , при которой эта мера вмешательства становится экономически целесообразной, составит примерно 31 мЗв/год, а соответствующее граничное значение остаточной дозы ~ 16 мЗв/год. Для трехкратной дезактивации эти границы составят для исходной дозы ~ 37 мЗв/год, для остаточной ~ 12 мЗв/год.

Издержки дезактивации, как показателя ее эффективности, определим также в расчете на одного индивидуума в виде суммы ущерба от остаточной дозы облучения и затрат на ее проведение:

$$Z = \lambda \psi D_R + c_e \cdot \ln \frac{D}{D_R}. \quad (7)$$

Значение остаточной дозы D_R , при котором издержки дезактивации являются минимальными, получим из уравнения:

$$\frac{dZ}{dD_R} = \lambda \psi - c_e \cdot \frac{1}{D_R} = 0. \quad (8)$$

Из выражения (8) следует, что оптимальное значение остаточной дозы облучения для дезактивации определяется следующей величиной:

$$D_R^1 = \frac{c_e}{\lambda \psi}, \quad (9)$$

которая не зависит от ее кратности.

Несложно убедиться, что такое же решение получим и при использовании альтернативного критерия эффективности дезактивации на максимум пользы, определенного левой частью выражения (3).

Оптимальное значение остаточной дозы для дезактивации любой кратности при приведенных выше данных оказывается равным:

$$D_R^1 = \frac{4 \cdot 10^3 (\$/\text{чел})}{15 \cdot 10^3 (\$/3\text{в}) \cdot 12 (\text{лет})} \approx (10) \\ \approx 22 \text{ мЗв/год}$$

С учетом этого из выражения (1) получим, что оптимальное значение издержек двукратной дезактивации в расчете на одного индивидуума приблизительно равно \$6,8 тысяч, \$2,8 тысячи из которых составляют затраты на эту меру, а \sim \$4 тысячи – ожидаемая стоимость потерь лет его жизни, обусловленных остаточной

дозой. При этом с увеличением исходной дозы облучения и кратности дезактивации затраты на нее будут расти, в то время как стоимость потерь жизни индивидуума остается неизменной.

3. Экономическое обоснование и оптимизация стратегии вмешательства, предполагающей дезактивацию и временную эвакуацию населения

Стратегию вмешательства, объединяющую дезактивацию и временную эвакуацию населения, целесообразно применять при высоком начальном уровне дозы D и относительно больших сроках проведения дезактивации. Она преследует цели снижения потерь, в первую очередь, от дозы облучения, которую могли бы получить жители, оставаясь на время дезактивации на загрязненной территории. Кроме того, реализация такой стратегии связана с дополнительными издержками, в состав которых в первом приближении можно включить потери от облучения профессионалов, проводящих дезактивацию, затрат на временное отселение жителей и потери от прекращения на этот период хозяйственной деятельности.

Потери от облучения профессионалов, как и ранее, оценим на основе стоимости полученной ими дозы облучения, в свою очередь определенной с учетом продолжительности периода дезактивации при следующих предположениях.

1. Продолжительность периода дезактивации будем считать пропорциональной величине оплаты труда проводящих ее профессионалов. С учетом этого можно записать следующее соотношение:

$$\tau_d \cdot k \cdot m \cdot v = \theta \left(c_e \ln \frac{D}{D_R} \right), \quad (11)$$

из которого следует, что продолжительность периода дезактивации может быть определена выражением:

$$\tau_d = \frac{\theta}{k \cdot m \cdot v} \left(c_e \ln \frac{D}{D_R} \right), \quad (12)$$

где τ_d – продолжительность «чистого» периода дезактивации (лет); m – среднедушевое (в расчете на

одного жителя) количество профессионалов, ежедневно проводящих дезактивацию в одну смену при 8-ми часовом дне; k – количество смен (1–3) работы профессионалов; θ – доля заработной платы в затратах на дезактивацию, $\theta \approx 0,3 \div 0,7$; v – отраслевой тариф оплаты труда при ликвидации последствий аварийных ситуаций (руб., \$/год). Его величина может быть определена с учетом того, что почасовую оплату труда ликвидаторов рекомендовано устанавливать в 3–5 кратном размере часовой тарифной ставки работающего в «нормальных» условиях индивидуума. В условиях Москвы часовой тариф для дезактиватора составит в среднем ~\$20/час, что при его 8-ми часовом рабочем дне и пятидневной рабочей неделе эквивалентно приблизительно \$45 тысячам в год.

2. Среднюю годовую дозу D_d , полученную профессионалом за период дезактивации, в первом приближении оценим, как среднюю арифметическую исходной и остаточной годовых доз, скорректированную на продолжительность его 8-и часовой работы в течение дня и пятидневной рабочей недели, согласно следующему выражению:

$$D_d = \frac{1}{2 \cdot 4} (D + D_R). \quad (13)$$

При упрощающем расчеты предположении, что $D \gg D_R$, выражение (13) приобретает следующий вид:

$$D_d = \frac{1}{8} D \quad (14)$$

С учетом этих предположений несложно заметить, что доза, получаемая профессионалом за период дезактивации, и обусловленные ей потери могут быть оценены на основе следующих выражений соответственно:

$$D_d'' = \frac{1}{8} D \tau_d = \frac{\theta \cdot D}{8 \cdot k \cdot m \cdot v} \left(c_e \ln \frac{D}{D_R} \right), \quad (15)$$

$$Q^-(D_d'') = \lambda D_d'' = \frac{\lambda \cdot \theta \cdot D}{8 \cdot k \cdot m \cdot v} \left(c_e \ln \frac{D}{D_R} \right). \quad (16)$$

Сумму затрат на временную эвакуацию и потерь, обусловленных прекращением на ее период хозяйственной деятельности, в расчете на одного индивидуума оценим на основе следующего выражения:

$$Z_e = \tau_d(p + q), \quad (17)$$

где Z_e – суммарные издержки временной эвакуации; p – стоимость питания, проживания, транспортировки одного жителя (руб., \$/год); q – суммарные (личные и корпоративные) потери от прекращения хозяйственной деятельности на загрязненной территории в расчете на одного человека (руб., \$/год). Сумму $(p + q)$ в первом приближении можно положить равной λ , т.е. \$15 тыс./год.

С учетом этих предположений, условие, определяющее дозовые границы целесообразного применения стратегии, объединяющей дезактивацию кратности f и временное отселение населения, приобретает следующий вид:

$$\lambda \psi (D - D_R) - c_e \ln \frac{D}{D_R} \times \left(1 + \frac{\lambda \cdot \theta \cdot D}{8 \cdot k \cdot m \cdot v} + \frac{\theta}{k \cdot m \cdot v} (p + q) \right) \geq 0 \quad (18)$$

Учитывая, что $D_R = \frac{D}{f}$, из (18) получим:

$$D \geq \frac{c_e \ln f \left(1 + \frac{\theta}{k \cdot m \cdot v} (p + q) \right)}{\psi \frac{f-1}{f} - c_e \cdot \frac{\theta}{8 \cdot k \cdot m \cdot v} \cdot \ln f}, \quad (19)$$

Из выражения (19) для $m = 0,2$; $k = 1$; $\theta = 0,5$ и приведенных выше значениях других параметров, например, получим, что пятикратная дезактивация ($f = 5$) становится экономически целесообразной при исходной дозе D , примерно в 80 мЗв/год, а трехкратная – при дозе D , примерно в 70 мЗв/год. Соответствующие границы для остаточных доз составляют 16 и 23 мЗв/год.

Общие издержки стратегии, объединяющей дезактивацию и временное отселение населения, определим, как сумму следующих составляющих: 1) потери от облучения населения остаточной дозой

D_R сумма затрат на дезактивацию (выражение (7)); 2) потери от облучения профессионалов, проводящих дезактивацию (выражение (16)); 3) потери из-за временного прекращения хозяйственной деятельности на загрязненной территории и затраты на переселение (выражение (17)).

Суммируя эти составляющие, получим:

$$Z = \lambda \psi D_R + c_e \ln \frac{D}{D_R} \times \left(1 + \frac{\lambda \cdot \theta \cdot D}{8 \cdot k \cdot m \cdot v} + \frac{\theta \cdot (p + q)}{k \cdot m \cdot v} \right). \quad (20)$$

Оптимальное значение остаточной дозы облучения, при котором издержки этой стратегии являются минимальными, найдем из аналога уравнения (8), который для выражения (20) имеет следующий вид:

$$\frac{\partial Z}{\partial D_R} = \lambda \psi - \frac{c_e}{D_R} \times \left(1 + D \frac{\lambda \cdot \theta}{8 \cdot k \cdot m \cdot v} + \frac{\theta(p + q)}{k \cdot m \cdot v} \right) = 0 \quad (21)$$

Из (21) вытекает, что оптимальное значение остаточной дозы D_R^2 для такой смешанной стратегии определяется следующим выражением:

$$D_R^2 = \frac{c_e}{\lambda \cdot \psi} \times \left(1 + \frac{\lambda \cdot \theta \cdot D}{8 \cdot k \cdot m \cdot v} + \frac{\theta(p + q)}{k \cdot m \cdot v} \right). \quad (22)$$

Этот результат можно трактовать как решение задачи минимизации издержек дезактивации без отселения (9) плюс поправка, обусловленная потерями от облучения профессионалов и затратами на временное отселение жителей с загрязненной территории и определенная следующим выражением:

$$\Delta D_R^* = \frac{c_e}{\lambda \cdot \psi} \times \left(\frac{\lambda \cdot \theta \cdot D}{8 \cdot k \cdot m \cdot v} + \frac{\theta \cdot (p + q)}{k \cdot m \cdot v} \right). \quad (23)$$

Заметим, что эта поправка уже зависит от уровня исходной дозы D .

4. Оценка неопределенности результатов

Анализируя полученные результаты отметим, что решения рассмотренных задач зависят от зна-

чений показателей, которые можно разделить на две группы. В первую из них включим организационно-экономические характеристики мер вмешательства, – стоимостные оценки затрат – c_e, p, q ; оплаты труда – θ и ν , а также коэффициент накопления дозы ψ и степень интенсивности дезактивации, определенную количеством дезактиваторов в расчете на одного жителя (показатель m и коэффициент сменности k). Значения этих характеристик относительно детерминированы в том смысле, что они приблизительно известны и могут меняться лишь в достаточно узких пределах и вследствие этого не вносят какой-либо существенной неопределенности в полученные решения.

Вместе с тем, значение m (как и коэффициент сменности k) выбирается органом управления в зависимости от имеющихся материальных и трудовых ресурсов и предполагаемых сроков дезактивации. Этот выбор может существенно повлиять на величину поправки (23). Например, при начальной дозе облучения $D = 0,3$ Зв/год (300 мЗв/год) и $m = 0,1$, при $k = 1$ и приведенных выше значениях других показателей, входящих в выражение (23), получим:

$$\Delta D_R^* \approx 1,7 \cdot D_R^1, \quad (24)$$

откуда следует, что

$$D_R^2 \approx 2,7 \cdot D_R^1, \quad (25)$$

Таким образом, оптимальное значение остаточной дозы при смешанной стратегии вмешательства, объединяющей дезактивацию и временное отселение населения, увеличилось почти в три раза по сравнению со своим аналогом для стратегии только дезактивации. Оно достигает почти 60 мЗв/год. С ростом показателей m и k величина дозовой поправки снижается, обуславливая и уменьшение значения дозы, оптимизирующей эту стратегию вмешательства. Для $m = 0,2$ и $k = 2$ значение поправки составит уже $0,42 \cdot D_R^1$ ($D_R^2 \approx 31$ мЗв/год), а для $m = 0,3$ и $k = 2 \sim 0,3 \cdot D^1$ ($D_R^2 = 29$ мЗв/год) и так далее. Однако, поскольку каждое из выбираемых значений m и k является детерминированной величиной, то оно также не увеличи-

вает неопределенность полученного для него решения.

В значительной большей степени неопределенность оптимальных оценок остаточных доз облучения и дозовых границ эффективного применения мер вмешательства обусловлена различиями в допущениях и предположениях, которые могут быть положены в основу расчетов выгод от снижения уровня радиационного воздействия. В частности, величина выгод может существенно различаться в зависимости от трактовки содержания понятия «радиационный риск», соответствующих ей методов оценки его значений, используемых при этом нормативов стоимости года человеческой жизни. Так, приведенные выше результаты были получены для, так называемых, пожизненных радиационных рисков, характеризующихся возможностями проявления стохастических эффектов (смертельного рака, несмертельного рака, приведенного по вреду к последствиям от смертельного рака, наследственных эффектов) при малых дозах облучения в течение всей последующей жизни индивидуума. При этом предлагалось, что в среднем один эффект ведет к потере 15 лет полноценной жизни, а вероятность его проявления находится в интервале $(5,6 \div 7,3) \cdot 10^{-2}$ /чел.-Зв (в зависимости от поло-возрастного состава населения) [6,11].

При такой трактовке риска не учитывается отложенный характер последствий облучения, обусловленный существованием значительных временных лагов между моментами облучения, проявления онкологического заболевания и смерти облученного индивидуума. В частности, продолжительность латентного периода онкологического заболевания, вызванного облучением, усредненная по всем их видам, оценивается величиной в 20 лет, открытого периода – в 5 лет [14]. В экономике стоимость отложенных по времени последствий принято оценивать с дисконтом, в нашем случае отражающим закономерности снижения ценности потерь будущих лет жизни индивидуума по сравнению с текущим годом. В предположении, что ценность года его жизни не меняется

во времени, ее стоимость в году t с учетом ее стоимости в текущем (нулевом) году и дисконтирования может быть определена согласно следующему выражению:

$$S(t) = \partial \cdot (1 + d)^{-t},$$

где $S(t)$, ∂ – стоимости года жизни индивидуума в году t и текущем году соответственно; d – дисконт, характеризующий темп снижения стоимости жизни за один год.

С учетом дисконтирования выгоды от снижения дозы облучения в первом приближении можно оценить по стоимости сбереженных лет жизни. В расчете на одного индивидуума для этого может быть использовано следующее выражение:

$$S = \partial \cdot \psi \cdot r_D \cdot (D - D_R) \sum_{t=t_1+1}^{t_1+\Delta t} (1 + d)^{-t}, \quad (26)$$

где r_D – коэффициент пожизненного риска смерти облученного индивидуума; произведение $r_D D$ – в соответствии с линейной беспороговой концепцией характеризует сверхфоновый риск смерти усредненного индивидуума от онкологического заболевания в течение его жизни после облучения дозой D ; t_1 – средняя продолжительность латентного и открытого периодов онкологического заболевания после облучения; Δt – среднее увеличение продолжительности жизни индивидуума в отсутствие заболевания.

Для выгод, определенных выражением (26) при средних значениях $t_1 = 25$ лет и $\Delta t = 15$ лет, аналог соотношения (3), характеризующий условие экономической целесообразности дезактивации с учетом дисконтирования, примет следующий вид:

$$\partial \cdot \psi \cdot r_D \cdot (D - D_R) \sum_{t=26}^{40} (1 + d)^{-t} - c_e \ln \frac{D}{D_R} \geq 0. \quad (27)$$

Из выражения (27) вытекает, что дезактивация становится эффективной мерой вмешательства при значениях исходной дозы D , удовлетворяющих следующему неравенству:

$$D \geq \frac{c_e}{\hat{\delta} \cdot \psi \cdot r_D \sum_{t=26}^{40} (1+d)^{-t}} \cdot \frac{f}{f-1} \cdot \ln f \quad (28)$$

При достаточно правдоподобном значении дисконта $d = 0,03$, обоснованном в нормативных документах значении пожизненного риска смерти усредненного индивидуума от онкологического заболевания $r_D = 5,5 \cdot 10^{-2}$ /чел.·Зв [6, 7], стоимости года жизни $\hat{\delta} = \$15$ тысяч и приведенных выше значениях других параметров, из выражения (28) получим, что, например, двукратная дезактивация является эффективной мерой вмешательства при уровнях исходных и остаточных доз, удовлетворяющих следующим неравенствам:

$$D \geq 98 \text{ мЗв/год} \\ (D_R \geq 49 \text{ мЗв/год}) \quad (29)$$

Для трехкратной дезактивации эти рубежи составляют 116 мЗв/год и 39 мЗв/год, для пятикратной – 125 мЗв/год и 25 мЗв/год, соответственно.

Издержки дезактивации в этом случае будут определяться следующим выражением:

$$Z = \hat{\delta} \cdot \psi \cdot r_D \cdot D_R \sum_{t=26}^{40} (1+d)^{-t} + c_e \ln \frac{D}{D_R}, \quad (30)$$

из которого следует, что оптимальное значение остаточной после дезактивации дозы облучения, минимизирующее ее издержки, находится как

$$D_R = \frac{c_e}{\hat{\delta} \cdot \psi \cdot r_D \cdot \sum_{t=26}^{40} (1+d)^{-t}} \quad (31)$$

При приведенных выше параметров, входящих в выражение (31), оптимальный уровень остаточной дозы облучения D_R для дезактивации любой кратности составит 70 мЗв/год.

Сопоставляя эти оценки с их аналогами, полученными без учета дисконтирования, можно сделать

вывод, что учет в выгодах эффектов снижения ценности лет жизни приводит к увеличению и нижних границ дозовых областей эффективного применения дезактивации, и оптимального значения остаточной после нее дозы облучения более чем в 3 раза. Однако, принимая во внимание крайне негативное отношение общества к радиационному риску, значение остаточной дозы в 70 мЗв/год все же представляется завышенным.

Столь же значительно дозовые границы эффективного применения мер вмешательства и оптимальные значения остаточных доз облучения меняются и при изменениях стоимости человеческой жизни. Например, в развитых странах ее величина, оцениваемая по среднему доходу, составляет \$30–45 тысяч. При таких значениях уровни этих дозовых показателей для дезактивации должны быть в 2–3 раза ниже, чем у их аналогов, полученных для РФ при соответствующих трактовках радиационного риска (см. выражения (4), (9) и (28), (31)).

Заметим также, что стоимость года жизни является достаточно субъективным показателем. Кроме среднегодового дохода она может оцениваться по методам готовности платить за снижение риска, «принять плату за риск», «страховых тарифов» и некоторым другим [15]. При этом результаты, полученные разными методами, могут значительно различаться (до 5 раз), что обуславливает такие же различия и в оценках дозовых параметров эффективного применения мер вмешательства. В этой связи показатель стоимости года жизни можно интерпретировать как субъективный индикатор отношения системы управления к риску, значение которого выбирается в зависимости от принятых норм радиационной безопасности и имеющегося ресурсного потенциала. Очевидно, что в «богатых» странах этот потенциал выше и при чрезвычайных ситуациях с утечкой радиации они могут обеспечить своему населению более высокий уровень радиационной защиты за счет увеличения затрат на вмешательство. Экономическим обоснованием для

этого является рост выгод от снижения дозы облучения, обусловленный более высокой стоимостью года человеческой жизни.

В этой связи показательным является пример Японии, где в результате аварии на АЭС «Фукусима-1» в 2011 г территории некоторых муниципалитетов префектуры Фукусима подверглись значительному радиационному загрязнению изотопами ^{134}Cs и ^{137}Cs [16]. На этих территориях правительство страны приняло решение использовать в качестве стратегий вмешательства дезактивацию с временным отселением жителей при исходных дозах от 20 до 50 мЗв/год и их консервацию с длительным отселением при дозах, превышающих 50 мЗв/год. С учетом того, что среднему доходу в Японии составляет примерно \$37500 в год, такое решение с точки зрения соотношения затрат и выгод представляется обоснованным. Кроме того, дезактивация была проведена в отдельных районах, где доза не превышала 20 мЗв/год, а временное отселение уже было осуществлено на ранних стадиях аварии, в качестве превентивной меры.

Вместе с тем, практика реализации этих стратегий показала их экономическую неэффективность вследствие того, что связанные с ними выгоды, оцениваемые по стоимости предотвращенной дезактивацией дозы облучения, оказались значительно меньше понесенных затрат. Это было обусловлено, во-первых, низкой плотностью проживавшего на этих территориях населения, вследствие чего уровень среднему дозовых затрат на дезактивацию c_e оказался завышенным по сравнению со значениями, использованными в наших расчетах. Во-вторых, целесообразность дезактивации в районах с годовыми дозами менее 20 мЗв/год представляется неочевидной, так как за период отселения порядка 5 лет ожидаемая дозовая нагрузка на жителей значительно сократится и при отсутствии вмешательства, вследствие достаточно высоких наблюдаемых темпов естественного снижения уровня облучения

($\mu = 0,03 \div 0,1$). Проведенные расчеты показали, что на рассматриваемых территориях в отсутствие дезактивации индивидуальная накопленная к концу 2018 года увеличилась бы всего на $5 \div 11$ мЗв по сравнению с ее уровнем, оставшимся после проведения дезактивации [17]. Таким образом, дезактивация территорий в окрестности АЭС «Фукусима-1» с исходной дозой облучения менее 20 мЗв/год выполняла в большей степени социальную функцию, связанную со снижением степени беспокойства населения при возвращении на загрязненные территории.

5. Заключение

В целом приведенные выше результаты свидетельствуют, что несмотря на некоторую условность использованных допущений, упрощающих процедуры расчетов, и неопределенность информации об уровнях радиационных рисков и стоимости жизни рациональные решения по организации защиты населения от избыточного излучения при чрезвычайных ситуациях с утечкой радиации на основе дезактивации и временного отселения жителей с высокой степенью надежности удовлетворяют поставленным МКРЗ ограничениям по допустимому уровню остаточной дозы облучения. Для долгоживущих радионуклидов экономически обоснованные значения остаточной дозы для таких затратных мер вмешательства при консервативном понимании радиационного риска (без дисконтирования), по видимому, не должны превышать 20–30 мЗв/год. Эти уровни можно также обосновать и с социальных позиций, отталкиваясь от понятия «пожизненная доза облучения». Принимая во внимание, что для профессиональных работников атомной промышленности РФ допустимая пожизненная доза облучения не должна превышать 1000 мЗв [11,18], можно предположить, что для населения ее значение не должно превышать дозу в 500–600 мЗв. Учитывая, что в большинстве регионов мира естественный радиационный фон (ЕРФ) дает пожизненную дозу в 150–180 мЗв, долю сверхфонового излуче-

ния, обусловленного чрезвычайной ситуацией, можно определить в 2–3 ЕРФ. Для индивидуума среднего возраста (35–40 лет) она достигается при проживании в течение $25 \div 30$ лет на загрязненной долгоживущими радионуклидами территории с остаточной дозой облучения в пределах 20–30 мЗв/год. Для радионуклидов с более коротким периодом жизни эти значения могут быть даже повышены. Заметим также, что при существовании сомнений в достоверности оценок исходной и остаточной доз, осторожном отношении к риску, наличии достаточных ресурсов уровень реальной дозы облучения может быть уменьшен за счет использования населением менее затратных индивидуальных средств защиты (укрытие, снабжения чистыми продуктами и т.п.), а также продления сроков временной эвакуации, в особенности наиболее чувствительных к облучению групп населения, в основном детей и беременных женщин.

Литература

1. Авария на АЭС «Фукусима-1»: опыт реагирования и уроки. Труды ИБРАЭ РАН, вып. 13/Научн. ред. Р.В.Арутюнян. – М.: Наука, 2013. – 248с.
2. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры/ Под общей ред. Л.А. Ильина, В.А. Губанова. – М.: Изд-во АТ, 2001. – 752с.
3. Арутюнян Р.В. Чернобыль-Фукусима: Ядерное противостояние. – М.: Наука, 2013. – 267с.
4. Защита населения от радиационного воздействия в случае радиологической атаки. Публикация МКРЗ №96. – М.: Изд-во Комтехпринт, 2006. – 107с.
5. Reichmuth B., Short S., Wood T. Economic Consequences of a Rad/Nuc attack: Cleanup Standards significantly Affect Cost//Working Together: Research & Development Partnerships in Homeland security Conference (April 28, 2005, Boston, MA) available at <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1030/ML103050492.pdf>
6. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication

103//Annals of the ICRP: Elsevier. – 2007. – v.37. – №2–4. – 343 p.

7. Публикация 103 Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер. с англ./ Под общей ред. М.Ф.Киселева и Н.К.Шандалы. – М.: ООО ПКФ «Алана», 2009. – 312с.

8. Crik M.J. Derived Intervention Levels for Invoking Countermeasures in the Management of Contaminated Agricultural Environments/Division of Nuclear Safety, IAEA. – Vienna, 1991. – 23p.

9. Burke R.P. Economic risks of nuclear power reactor accidents. – Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1983. – 71p.

10. Ostmeyer R.M., Runkle G.E. An Assessment of Decontamination Costs and Effectiveness for Accident Radiological Releases. Albuquerque, N.Y.: Sandia National Laboratories, 1984. – 52p.

11. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99): Гигиенические нормативы. – М.: Минздрав России, 1999. – 116с.

12. Generic handbook for assisting in the management of contaminated inhabited areas in Europe following a radiological emergency/BrownJ[etc.] – Oxford: EURANOS, 2007. – 86p.

13. Ильясов Д.Ф. Подходы к экономическому обоснованию нормативов радиационной безопасности при аварийных ситуациях // Ресурсы. Информация. Снабжение. Конкуренция. П-2015, апрель-июнь. – С. 168–173.

14. Тихомиров Н.П., Ильясов Д.Ф. Приведенные оценки радиационных рисков в структуре рисков жизнедеятельности // Экономика природопользования. – №4, 2013. – С. 130–142.

15. Тихомирова Т.М. Методы анализа состояния и потерь здоровья населения в регионах России. – М.: ФГБОУ ВПО «РЭУ им. Г.В. Плеханова», 2012. – 352 с.

16. Progress on Off-site Cleanup Efforts in Japan. Ministry of the Environment, Japan February 2015. [Online]. URL.: http://josen.env.go.jp/en/pdf/progressset_progress_on_cleanup_efforts.pdf141022.html.

17. Арон Д.В., Тихомиров Н.П., Цуглевич В.Н. Анализ эффективности дезактивации территории в

префектуре Фукусима на примере муниципалитета Тамура // Экономика природопользования. – 2015. – №3. – С. 113–121.

18. Оценка профессиональных радиационных рисков персонала Госкорпорации «Росатом», включенного в систему АРМИР/ В.К. Иванов и др.// Радиация и риск. – Москва – Обнинск: ФГБУ МРНЦ Минздравсоцразвития. – 2012. – вып. №3. – том 21. – С. 60–74.

References

1. Avaria na AES Fukusima-1: opit reagirovania I uroki. Trudi IBRAE RAN, vip 13./Nauchn. red. R. B. Arutnyan. – M.: Nauka, 2013. – 248 s.

2. Krupnie radiacionnie avarii: posledstvia I zaschitnie meri/ Pod obschey red. L.A. Iljina, V.A. Gubanova. – M.: Izd-vo AT, 2001. – 752 s.

3. Arutjunian R.V. Chernobil-Fukusima: Jadernoe protivostojanie. – M.: Nauka, 2013. – 267s.

4. Zashchita naselenija ot radiacionnogo vozdejstvija v sluchae radiologicheskoji ataki. Publikacija MKRZ №96. – M.: Izd-vo Komtehprint, 2006. – 107s.

5. Reichmuth B., Short S., Wood T. Economic Consequences of a Rad/Nuc attack: Cleanup Standards significantly Affect Cost//Working Together: Research & Development Partnerships in Homeland security Conference

(April 28, 2005, Boston, MA) available at <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1030/ML103050492.pdf>

6. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103//Annals of the ICRP: Elsevier. – 2007. – v.37. – №2–4. – 343p.

7. Publikacija 103 Mezhdunarodnoji komissii po radiacionnoji zaschite (MKRZ). Per. s angl./Pod obscheji red. M.F. Kiseleva i N.K. Shandali. – M.: OOO PKF «Alana», 2009. – 312s.

8. Crik M.J. Derived Intervention Levels for Invoking Countermeasures in the Management of Contaminated Agricultural Environments/Division of Nuclear Safety, IAEA. – Vienna, 1991. – 23p.

9. Burke R.P. Economic risks of nuclear power reactor accidents. – Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1983. – 71p.

10. Ostmeyer R.M., Runkle G.E. An Assessment of Decontamination Costs and Effectiveness for Accident Radiological Releases. Albuquerque, N.Y.: Sandia National Laboratories, 1984. – 52p.

11. Normi radiacionnoji bezopasnosti (NRB-99): Gigienicheskie normativi. – M.: Minzdrav Rossii, 1999. – 116s.

12. Generic handbook for assisting in the management of contaminated inhabited areas in Europe following a

radiological emergency/BrownJ[etc.] – Oxford: EURANOS, 2007. – 86p.

13. Ilijasov D.F. Podhodi k ekonomicheskomu obosnovaniju normativov radiacionnoji bezopasnosti pri avarijnih situacijah // Resursi. Informacija. Snabzhenie. Konkurencija. II-2015, aprel-ijun. – S. 168–173.

14. Tikhomirov N.P., Ilijasov D.F. Privedenie ocenki radiacionnih riskov v strukture riskov ziznedejatelnosti // Ekonomika prirodnopolzovanija. – №4, 2013. – S. 130–142.

15. Tikhomirova T.M. Metodi analiza sostojania i poter zdorovia naselenija v regionah Rossii. – M.: FGBOU VPO «REU im. G.V. Plehanova», 2012. – 352 s.

16. Progress on Off-site Cleanup Efforts in Japan. Ministry of the Environment, Japan February 2015. [Online]. URL.: http://josen.env.go.jp/en/pdf/progresseet_progress_on_cleanup_efforts.pdf141022.html.

17. Aron D.V., Tikhomirov N.P., Cuglevich V.N. Analiz effektivnosti dezaktivacii territorii v prefektуре Fukusima na primere municipaliteta Tamura // Ekonomika prirodnopolzovanija. – 2015. – №3. – S. 113–121.

18. Ocenka professionalnih radiacionnih riskov personala Goskorporacii «Rosatom», vkluchennogo v sistemu АРМИР/ V.K. Ivanov i dr.// Radiacija i risk. – Moskva – Obninsk: FGBU MRNC Minzdravsocrazvitija. – 2012. – vip. №3. – том 21. – S.60–74.