

Литература

1. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия-Беларусь) / под ред. Ю.А. Израэля, И.М. Богдевича. – М. : Инфосфера, 2009. – 140 с.
2. Государственный доклад “О состоянии окружающей природной среды Российской Федерации в 1993 году”. – С. 64–69.
3. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Обеспечение условий радиационной безопасности при сельскохозяйственном землепользовании. – СанПиН 2.6.1. – М. : Минздрав России, 2000.
4. Коваленко Г.Д. Радиоэкология Украины : монография. – Харьков : Инжек, 2008. – 264 с.
5. Справочник по радиационной обстановке и дозам облучения населения районов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС / под ред. М.И. Баллонова. – СПб., 1992. – 140 с.
6. Чернобыль: радиационный мониторинг сельскохозяйственных угодий и агрохимические аспекты снижения последствий радиоактивного загрязнения почв (к 30-летию техногенной аварии на Чернобыльской АЭС) / В.Г. Сычев, М.И. Лунев, П.М. Орлов и др. – М. : ВНИИА, 2016. – 184 с.

РАЗВИТИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ РИСКА, СВЯЗАННОГО С ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Н.А. Осипова

Томский политехнический университет, osipova@tpu.ru

DEVELOPMENT OF STUDIES IN THE FIELD OF ANALYSIS AND RISK ASSESSMENT RELATED TO THE EXPOSURE TO IONIZING RADIATION

N.A. Osipova

Tomsk Polytechnic University

Целью настоящей работы является анализ методических подходов к оценке риска в ситуациях воздействия на население радиационных факторов внешней среды.

В конце 50-х – начале 60-х гг. XX в. формируется новое научное междисциплинарное направление в области анализа и оценки техногенного риска, в разных областях деятельности человека [1–5, 11], закладываются основы гигиенической оценки риска для здоровья населения при действии химических веществ. Сформировался понятийный аппарат, разработана целостная теория на основе системного подхода. Показатели риска используются в нормативных документах, инструкциях, отраслевых руководствах в области промышленной безопасности и санитарно-гигиенического нормирования [12–14]. Благодаря накопленному большому практическому опыту, оформились сферы приложения анализа риска, среди которых оценка риска, связанного с ионизирующим излучением, пополняется обширными практическими исследованиями и расчетами [6–9, 17, 19–22, 24]. Понятие “радиационный риск” вошло в научный лексикон специалистов и организаций, занимающихся проблемами радиационной безопасности.

Чернобыльская авария (все научные исследования в области промышленной, техногенной и экологической безопасности всегда инициировались какой-либо крупной промышленной аварией и катастрофой) дала толчок исследованиям в области радиационной безопасности [3, 4, 9, 10]. На рубеже веков были завершены комплексные проекты по оценке радиологических последствий атомной бомбардировки 1945 г., Чернобыльской аварии, испытаний ядерного оружия в Семипалатинс-

ке. Прогрессу в области оценки радиационного риска послужил также и тот факт, что информация о радиационных авариях и катастрофах, связанных с подземными испытаниями ядерного оружия, о воздействии малых доз радиации, стала открытой для публикации. Появляются новые данные о воздействии на население радионуклидов в быту, при медицинском радиодиагностическом облучении, при хранении и транспортировке отработанного ядерного топлива и других радиационно-опасных веществ, в районах расположения радиационно-опасных объектов, мест захоронения ядерных отходов.

Все эти факторы послужили определенному прогрессу в оценке радиационного риска, однако нельзя не упомянуть, с какими трудностями сталкиваются исследователи в данной сфере деятельности.

В первую очередь, это касается оценки отдаленных эффектов облучения низкими дозами ионизирующей радиации значительных контингентов людей. Международной комиссией по радиологической защите (МКРЗ) и Научным комитетом ООН по действию атомной радиации (НКДАР) официально признана линейная беспороговая концепция [15, 18]. Расчеты с использованием беспороговой модели показали, что ожидаемые уровни риска сильно завышены, хотя полученные дозы облучения не намного отличаются от доз, обусловленных природным радиационным фоном. Вместе с тем, числовые значения рисков при малых дозах получены с большой погрешностью из-за явной недостаточности эпидемиологических данных, используемых в пороговых моделях для обоснования численного значения порога возник-

новения радиационно-индуцированных онкологических заболеваний.

Существует понятие, или термин “риск радиационный”, которое охватывает широкую проблематику, связанную с радиационным нормированием, защитой от ионизирующего излучения и с радиационной безопасностью [3–5, 9]. В таком контексте можно говорить о риск-ориентированном подходе в регулирующей деятельности в области ядерной и радиационной безопасности [23]. Однако в широкой практике оценки опасностей и рисков, в том числе и в деятельности таких международных организаций как МКРЗ и НКДАР, “риск радиационный” понимается как величина, которую можно количественно оценить. Настоящая работа ограничивается анализом подходов к количественной оценке радиационного риска, понимая под радиационным риском вероятность возникновения у человека или его потомства какого-либо вредного эффекта в результате облучения [12–18]. Это безразмерная величина, если риск означает вероятность. Однако она принимает некоторую размерность, если риск означает математическое ожидание последствий, т.е. произведение вероятности и тяжести последствия события.

Первоначальный подход согласно рекомендациям НКДАР и МКРЗ [15, 18] имел сравнительный характер: сравнивались коллективные дозы или дозы на душу населения, полученные от конкретного источника ионизирующего излучения по сравнению с дозами от естественного радиационного фона. Сейчас, когда в практику вошли более совершенные методы оценки, этот подход не потерял своей актуальности, так как он позволяет избежать неопределенности, связанной с использованием коэффициентов риска в современных моделях и расчетах, о чем будет сказано ниже.

Общая теоретико-вероятностная методология анализа риска является фундаментом для оценки радиационного риска. В то же время накопленный в области анализа радиационных рисков научный и технологический потенциал расширяется на анализ и контроль химического загрязнения и его воздействия на человека и окружающую среду.

При оценке радиационного риска в современных методиках используются различные показатели, характеризующие воздействие излучения на вещество, среди которых к наиболее важным относятся поглощенная (D), эквивалентная ($H_{T,R}$), эффективная (E) дозы, доза в органе или ткани (D_T), линейная передача энергии (ЛПЭ) [1–5]. Использование при расчете риска эквивалентной (учитывающей различные взвешивающие коэффициенты для разных видов излучения) и эффективной (учитывающей различия в чувствительности различных тканей и органов к облучению) вместо поглощенной дозы, повысило точность в оценке радиационного риска.

Доза поглощенная (D) – величина энергии ионизирующего излучения, переданная веществу:

$$D = de / dm,$$

где de – средняя энергия, переданная ионизирующим излучением веществу, находящемуся в элементарном

объеме; dm – масса вещества в этом объеме. В единицах СИ поглощенная доза измеряется в Дж/кг и имеет специальное название – грей (Гр).

Доза, поглощенная человеком, складывается из доз, поглощенных отдельными тканями организма. Для характеристики доз, поглощаемых отдельными тканями и органами человека, используют специальную дозиметрическую величину – дозу в органе.

Линейная передача энергии (ЛПЭ) – физическая характеристика качества ионизирующего излучения, характеризует локализацию поглощенной энергии излучения, зависит от природы излучения и энергии частиц. Поглощенная доза не учитывает тот факт, что излучение с большей ЛПЭ производит больше нарушений в биологической ткани. Чтобы учесть указанный эффект, вводят понятие эквивалентной дозы.

Доза эквивалентная ($H_{T,R}$) – поглощенная доза в органе или ткани, умноженная на соответствующий взвешивающий коэффициент для данного вида излучения:

$$H_{T,R} = W_R D_{R,T},$$

где W_R – взвешивающий коэффициент для излучения R ; $D_{T,R}$ – средняя поглощенная доза в органе или ткани T .

При воздействии различных видов излучения с различными взвешивающими коэффициентами эквивалентная доза определяется как сумма эквивалентных доз для этих видов излучения:

$$H_{T,R} = \sum H_{T,R_i}.$$

Единицей эквивалентной дозы является Зиверт.

Радиационное облучение разных органов и тканей организма характеризуется различиями в вероятностях возникновения вредных последствий и степени их тяжести. Поэтому вводят понятие эффективной дозы.

Доза эффективная (E) – мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их радиочувствительности. Она представляет сумму произведений эквивалентной дозы в органах и тканях H_T на соответствующие взвешивающие коэффициенты для органов или тканей W_T :

$$E = \sum W_T H_T.$$

Доза эффективная коллективная – мера коллективного риска возникновения стохастических эффектов облучения. Она равна сумме индивидуальных эффективных доз, измеряется в (чел.-Зив.).

Действие ионизирующего излучения на организм может проявляться как в форме острой лучевой болезни (детерминированные эффекты излучения, в настоящей работе не рассматриваются), так и в возрастании степени риска отдаленных последствий, как правило, онкологических и генетических (стохастические эффекты).

Индивидуальный риск возникновения стохастических эффектов r_{ic} определяется как

$$r_{ic} = \int p_i(E)r_E dE$$

где E – индивидуальная эффективная доза; $p_i(E)dE$ – вероятность для i -того индивидуума получить годовую эффективную дозу от E до $E + dE$; r_E – коэффициент пожизненного риска сокращения длительности периода полноценной жизни в среднем на 15 лет на один стохастический эффект (от смертельного рака, серьезных наследственных эффектов и несмертельного рака, приведенного по вреду к последствиям от несмертельного рака), или номинальный коэффициент вероятности стохастических эффектов [14]. В НРБ-99 для доз $E < 200$ мЗв/год (для малых доз) приняты коэффициенты риска:

- а) для персонала – $r_E = 5,6 \cdot 10^{-2} = 0,056 \text{ чел.}^{-1} \cdot \text{Зв}^{-1}$;
- б) для населения – $r_E = 7,3 \cdot 10^{-2} = 0,073 \text{ чел.}^{-1} \cdot \text{Зв}^{-1}$.

Коэффициенты риска отличаются при воздействии больших доз и изменяются достаточно в широких пределах в научной литературе, что вносит большой вклад в неопределенность при оценке риска [20, 21].

В практическом плане это, по сути, означает, что индивидуальный риск возникновения стохастических эффектов пропорционален эффективной дозе, коэффициентом пропорциональности является коэффициент риска. Этот принцип положен в основу государственного радиационного нормирования в РФ [13, 14]. Предел индивидуального пожизненного риска в условиях нормальной эксплуатации для техногенного облучения персонала в течение года принимается 10^{-3} , для населения – $5 \cdot 10^{-5}$. В связи с тем, что радиационный риск традиционно оценивает “вероятность возникновения вреда здоровью”, а канцерогенный риск при воздействии химических веществ – “вероятность возникновения дополнительного числа онкологических заболеваний”, в большом числе научных публикаций радиационные риски оцениваются по числу дополнительных случаев онкологических заболеваний или смертельных исходов в результате воздействия ионизирующего излучения [11].

Следует различать оценки, выполненные на основе результатов непосредственных измерений (дополнительная смертность или заболеваемость, относительный риск, атрибутивный риск, и т.д.) и прогностические эффекты облучения, оцениваемые по результатам моделирования. В модели первого доклада Европейского Комитета по Радиационному Ризику (ЕКРР), 2003, [16] использованы данные самых последних на тот момент радиологических и эпидемиологических исследований. Была предложена модель и система расчетов на ее основе, результаты которой согласуются как с механизмом действия радиации на уровне живой клетки, так и наблюдениями заболеваемости в облученной популяции.

Концептуальная модель оценки риска, создаваемого радиационным облучением при низких дозах и мощностях дозы, основывается на эпидемиологических данных, касающихся риска от высоких доз и/или мощностей дозы. Экстраполяцию к низким уровням облучения, которые и представляют интерес в экологически значимых ситуациях, проводят с помощью коэффициента эффективности дозы и мощности дозы. Сейчас МКРЗ

[18] рекомендует использовать значение равное 2, что означает, что индуцирование рака при малых дозах и мощностях дозы должно быть в 2 раза меньше, чем это следовало бы из наблюдений при высоких дозах и мощностях дозы. Наибольшее распространение получили две модели прогноза риска: аддитивная и мультипликативная. В аддитивной модели прогноза риска предполагается, что облучение приводит к атрибутивному риску, который пропорционален дозе, но не зависит от естественной вероятности эффекта (естественной смертности от рака). В мультипликативной модели предполагается, что облучение приводит к атрибутивному риску, который пропорционален дозе и естественной вероятности эффекта. Обе модели уязвимы для критики. В настоящее время существует несколько вариантов моделей радиационного риска [26–28], разработанных различными международными и национальными организациями. Они учитывают возраст облучения и наблюдения, чувствительность разных органов тела человека к облучению.

Современные методики разрабатываются на основе строгих положений математического анализа, теории вероятности и математической статистики, точных математических определений показателей риска и расчетных формул. Создаются частные методики на основе обобщенных для различных ситуаций облучения [6, 7, 12]:

- населения за счет длительного равномерного техногенного облучения в малых дозах; а также населения, проживающего в зонах наблюдения радиационно-опасных объектов за счет источников внешнего и внутреннего облучения при нормальной эксплуатации радиационных объектов и при радиационной аварии; населения за счет радона;
- пациентов при использовании источников ионизирующего облучения в медицине;
- персонала, работающего с источниками ионизирующих излучений за счет источников внешнего и внутреннего облучения.

Разрабатываются методики, позволяющие оценивать риск в специфических или обобщенных показателях индивидуального или популяционного риска в их возможной зависимости от особенностей источника воздействия, от времени, возраста, местных условий, а также в интегрированной или усредненной форме; выбор показателей зависит от постановки задачи и практического применения результатов. С их использованием уже получены оценки риска здоровью населения на территориях России, пострадавших от ядерных испытаний и Чернобыльской аварии [6].

Параллельно с методикой развиваются компьютерные программные средства, например, BARD (Bank of Data for Analysis of Risk), развивается в НИЦ “Курчатовский институт”; TERA (Tools for Environmental Risk Assessment), НИИ ЭЧ ГОС им. А.Н. Сысина [6]; Radtran, являющийся подпрограммой Intertran-2, программа RISKIND [29–30], и многие другие.

Литература

1. Алымов В.Т., Тарасова Н.П. *Техногенный риск. Анализ и оценка: учебн. пос. для вузов.* – М.: Академкнига, 2004. – 118 с.
2. Алымов В.Т., Крапчатова В.П., Тарасова Н.П. *Анализ техногенного риска: учебное пособие для студентов вузов.* – М.: Круглый год, 2000. – 160 с.
3. Барсуков О.А., Барсуков К.А. *Радиационная экология.* – М.: Научный мир, 2003. – 253 с.
4. Белозерский Г.Н. *Радиационная экология: учебник.* – М.: Академия, 2008. – 384 с.
5. Ваганов П.А. *Ядерный риск.* – СПб.: Изд-во СПб. ун-та, 1997. – 110 с.
6. Демин В.Ф., Захарченко И.Е. *Риск воздействия ионизирующего излучения и других вредных факторов на здоровье человека: методы оценки и практическое применение // Радиационная биология. Радиоэкология.* – 2012. – Т. 52, № 1. – С. 77–89.
7. Жуковский М.В. *Радиационное воздействие на население оценка радиационных рисков и потенциального ущерба здоровью (на материалах Свердловской области): автореф. дис. ... докт. техн. наук.* – Екатеринбург, 2003. – 48 с.
8. Корчевский А.А. *Применение математического моделирования в задачах оценки воздействия Семипалатинского испытательного ядерного полигона на здоровье населения Павлодарской области: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук.* – 1993. – 36 с.
9. Крышев И.И., Рязанцев Е.П. *Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России.* – М.: ИздАТ, 2000. – 383 с.
10. *Медицинские радиологические последствия Чернобыля: прогноз и фактические данные спустя 30 лет.* – Обнинск: МРНЦ им. А.Ф. Цыба, 2016. – 191 с.
11. *Методологические подходы к оценке риска для здоровья в гигиенических исследованиях / А.М. Библин, И.А. Зыкова, Т.М. Королева и др. // Радиационная гигиена.* – 2013. – Т. 6, № 2.
12. *Методические рекомендации по оценке риска в применении к ситуациям после ядерных испытаний или аварий / В.Я. Голиков, В.Ф. Демин, В.К. Иванов и др.* – 1996. – Вып. 8. – С. 133–158.
13. МУ 2,1,10,3014–12. *Оценка радиационного риска у населения за счет длительного равномерного техногенного облучения в малых дозах. Радиационная гигиена.* – 2012. – Т. 5, № 4. – С. 68–77.
14. *Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). СанПин 2,6,1,2523–09.* – Взамен НРБ-99: утв. Мин-вом здравоохранения РФ 07,07,2009: введ. 01.09.2009. – М., 2009. – 61 с.
15. *Радиационная безопасность. Рекомендации Международной комиссии по радиологической защите 1990 года. Публикации 60 МКРЗ. Ч. 2.* – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 208 с.
16. *Рекомендации 2003 Европейского Комитета по радиационному риску. Выявление последствий для здоровья облучения ионизирующей радиацией в малых дозах для целей радиационной защиты. Регламентирующее издание, Брюссель, 2003 / под ред. Крисса Басби.* – М., 2004 – 218 с.
17. *Радиация: дозы, эффект, риск.* – М.: Мир, 1988. – 79 с.
18. *Рекомендации Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) от 2007 года. Публикация 103 МКРЗ / пер. с англ., под общ. ред. М.Ф. Киселева и Н.К. Шандалы.* – М.: Алана, 2009. – 344 с.
19. *Рихванов Л.П. Общие и региональные проблемы радиоэкологии.* – Томск: Изд-во ТПУ, 1997. – 384 с.
20. *Суслин В.П. Отдаленные эффекты облучения населения вследствие длительного воздействия малых доз ионизирующей радиации (Оценка радиационного риска): руководство.* – Новосибирск, 1998. – 140 с.
21. *Суслин В.П. Последствия воздействия малых доз ионизирующих излучений на человека в регионах Сибири и Дальнего Востока: автореф. дис. ... докт. мед. наук.* – 2003. – 39 с.
22. *Оценка влияния радиационного загрязнения на здоровье человека // Материалы конференции, 29 марта 2001 г.* – Новосибирск: АртИнфоДата, 2001. – 92 с.
22. *Хамаза А. Риск-ориентированный подход в регулирующей деятельности в области ядерной и радиационной безопасности // Радиация и риск.* – 2015. – Т. 24, № 4. – С. 87–97.
23. *Яблоков А.В. Миф об экологической чистоте ядерной энергетики.* – М.: Психология, 2001. – 136 с.
24. *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. UNSCEAR 1988. Report to the General Assembly.* – New York: UN, 1988.
25. *Health effects of exposure to low levels of ionizing radiation (BEIR V).* – Washington, D.C.: National Academy Press, 1990.
26. *SPIDER-1: Software for evaluating the detriment associated with radiation exposure, NRPB – R261, NRPB / P.J. Stokell, J.D. Robb, M.J. Crick et al.* – UK, 1993.
27. *Radiation Dose Assessment for the Transport of Nuclear Fuel Cycle Materials // WNTI Review Series.* – 2006. – No. 2.
28. *Neuhauser K.S., Kanipe F.L., Radtran 4: A computer code for transportation risk analysis, Rep. SAND-89-2370, TTC-0943, Sandia Natl Lab., NM.* – 1992.
29. *Riskind: A computer program for calculating radiological consequences and health risks from transportation of spent nuclear fuel, Rep. ANL/EAIS-6, Argonne Natl Lab., IL / Y.C. Yuan, S.Y. Chen, D.J. Lepoivre et al.* – 1993.