

ФГБОУ ВО «РОССИЙСКИЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМ. Г.В. ПЛЕХАНОВА»

На правах рукописи

Ильясов Дамир Фатович

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ  
РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Специальность 08.00.12 – бухгалтерский учет, статистика

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата экономических наук

Научный руководитель  
д.э.н., проф. Тихомиров Н.П.

Москва – 2016

**Оглавление**

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1 Теоретико-методологические проблемы оценки радиационных рисков и эффективности мероприятий радиационной безопасности.....	13
1.1 Социально-экономические последствия инцидентов, связанных с выбросом радиации.....	13
1.2 Особенности воздействия ионизирующего излучения на организм человека.....	18
1.3 Система показателей радиационного риска и эффективности мероприятий радиационной безопасности.....	23
1.4. Модели оценки радиационного риска .....	34
Глава 2 Модифицированные подходы к оценке радиационных рисков .....	48
2.1 Факторы, влияющие на достоверность и статистическую значимость оценок радиационного риска .....	48
2.2 Методы аппроксимации радиационных рисков при малых дозах облучения .....	56
2.3 Совершенствование подходов к оценке радиационного риска.....	64
2.4 Сопоставление оценок пожизненного радиационного риска смерти от онкологических заболеваний, полученных согласно различным моделям для жителей России.....	70
2.5 Временная и стоимостная оценка ущерба потерь здоровья населения в России от радиационного воздействия .....	82
Глава 3 Методы оценки эффективности защитных мероприятий по устранению последствий крупных радиационных аварий.....	88
3.1 Оценка эффективности мероприятий по устранению последствий аварии на Чернобыльской АЭС.....	88
3.2 Статистические методы оценки эффективности защитных мероприятий .....	96

3.2.1 Оценка эффективности дезактивации территории .....	97
3.2.2 Оценка эффективности временной эвакуации населения на период дезактивации территории .....	105
3.2.3 Оценка эффективности постоянного отселения жителей с полной консервацией территории.....	110
3.2.4 Оценка эффективности повышения качества медицинского обслуживания ликвидаторов радиационных аварий.....	113
3.3 Методологические подходы к оптимизации стратегии управления последствиями радиационных аварий с учетом оценок рисков .....	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	125
Список сокращений и условных обозначений.....	134
Список литературы .....	135
Приложение к главе 1 .....	151
Приложение к главе 2 .....	168
Приложение к главе 3 .....	174

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Расширяющиеся масштабы применения радиоактивных материалов в различных сферах народного хозяйства, рост их добычи и переработки объективно способствуют увеличению вероятности возникновения инцидентов с утечкой радиации. К числу наиболее значимых по своим последствиям таких инцидентов относятся техногенные аварии на объектах атомной промышленности и умышленное распространение радиоактивных веществ в местах массового проживания людей (террористические акты). Подобные происшествия объективно повышают уровень загрязненности окружающей среды, увеличивают риски потерь здоровья населения, ухудшают качество его жизни.

В этой связи усиливается внимание мировой общественности к проблемам обеспечения защиты населения от радиационного воздействия при аварийных ситуациях. Однако их решение затрудняется (в особенности при малых дозах облучения до 200 мЗв/год) из-за недостаточной разработанности подходов и статистических методов оценки радиационных рисков и показателей эффективности мероприятий, направленных на их снижение, в условиях значительной неопределенности информации о последствиях облучения для населения и о влиянии рискоснижающих затрат на уровни радиационного воздействия и обусловленные ими экономические и социальные выгоды для общества. Вместе с тем, как показывает практика ликвидации последствий крупных радиационных аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1», подавляющее большинство населения подвергается воздействию именно малых доз.

Недостаточная разработанность проблематики оценки радиационных рисков и эффективности рискоснижающих мероприятий при малых дозах облучения и предопределяет актуальность темы диссертационного исследования.

**Степень научной разработанности проблемы.** Подходы, методы и модели оценки воздействия ионизирующего излучения на организм человека во всем

спектре доз и эффективности мероприятий по обеспечению радиационной безопасности населения в ситуациях аварийного облучения в научной и специальной литературе получили достаточно широкое освещение. Они представлены в материалах Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ), Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), Научного комитета по действию атомной радиации ООН (НКДАР ООН), Агентства по защите здоровья населения (Health Protection Agency – HPA, Great Britain), Объединенной Японско-американской организации исследования эффектов радиационного воздействия (Radiation effects research foundation – RERF), Медицинского радиологического научного центра РАМН (МРНЦ), Института проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (ИБРАЭ РАН) и ряда других организаций. Значительный вклад в вопросы оценивания радиационных рисков и эффективности мер вмешательства внесли такие специалисты как Р.П. Бурк, Д. Гофман, В.К. Иванов, М. Крик, А.В. Носовский, Д. Пирс, Д. Престон, Е. Рон, Т.Е. Томпсон, А.Ф. Цыб и некоторые другие. Обоснованность результатов этих исследований, в основном, базируется на информации о последствиях облучения населения вследствие крупных радиационных катастроф, в частности атомных бомбардировок японских городов Хиросима и Нагасаки, аварий на ПО «Маяк» (Челябинская область, Россия), Чернобыльской АЭС (Украина) и АЭС «Фукусима-1» (Япония), понесенных затратах на снижение уровня радиационного риска и достигнутых на их основе результатах. Для обработки этой информации, как правило, используются методы оценки статистических показателей, математической статистики и эконометрического моделирования, значительный вклад в разработку которых внесли С.А. Айвазян, М.Ю. Афанасьев, И.И. Елисеева, М. Кендэл, Д. Кокс, Я.Р. Магнус, В.С. Мхитарян, А.И. Орлов, Т.В. Рябушкин, И. Фишер и многие другие.

Вместе с тем приведенные в официальных документах оценки радиационных рисков и вытекающие из них дозовые нормативы и характеристики эффективности рискоснижающих мероприятий подвергаются критике рядом отечественных и зарубежных специалистов, в первую очередь, по причине

несоответствия расчётных уровней рисков при малых дозах облучения реальным потерям здоровья и жизни населения. Эта критика широко представлена в работах Б.Н. Амеса, Р.В. Арутюняна, С. Брейера, В.К. Вонга, Л.С. Голда, С.Г. Госса, И.И. Линге, П. Пеллезина, П. Словича, Н.П. Тихомирова, М. Тубиана, В.Л. Чена, З. Яворовского и ряда других специалистов. В их работах отмечено, что завышенный уровень рисков влечет за собой ошибки в оценке эффективности мероприятий радиационной безопасности, в обоснованности решений по защите населения, следствием чего является нерациональное расходование средств на эти цели без достижения реальных эффектов в виде снижения обусловленных радиацией заболеваемости и смертности.

На наш взгляд, недостаточная достоверность оценок радиационного риска при малых дозах облучения населения в условиях неопределенности исходных данных в значительной степени вызвана несовершенством статистических методов, используемых при их обработке и моделировании. В частности, в предложенных в официальных документах моделях зависимостей типа «доза-эффект» не учитываются половозрастные особенности реакции организма на облучение, структура онкологической заболеваемости, частотные и временные параметры, отражающие закономерности проявления отдельных видов болезней, и другие факторы. Это, в свою очередь, снижает обоснованность рекомендаций по применению на практике мер по защите населения вследствие недостоверности оценок дозовых границ, в пределах которых их использование является обоснованным и с социальной, и с экономической точек зрения, в оценках связанных с ними затрат, выгод и эффективности в целом.

Необходимость дальнейшего совершенствования методов и моделей оценки радиационных рисков и эффективности мероприятий радиационной безопасности и предопределили выбор объекта, предмета, цели и задач диссертационного исследования.

**Цель и задачи исследования.** Цель диссертационного исследования состоит в разработке комплексных подходов и процедур оценки радиационных рисков и эффективности мероприятий радиационной безопасности,

базирующихся на методах статистики и эконометрического моделирования, в условиях недостаточной исходной информации о последствиях облучения для здоровья населения, затратах и выгодах, связанных со снижением уровня радиационного воздействия.

В соответствии с этой целью в работе поставлены и решены следующие задачи:

- сформирована система статистических показателей, характеризующих радиационные риски и эффективность рисковоснижающих мероприятий;

- определен состав и объем исходной информации, необходимой для получения достоверных оценок радиационных рисков;

- разработаны модифицированные подходы и усовершенствованы модели оценки радиационных рисков;

- получены количественные оценки радиационных рисков для различных половозрастных групп населения России при остром и хроническом облучениях в малых дозах;

- разработаны методологические подходы к оценке дозовых границ области эффективного применения защитных мероприятий и получены аналитические выражения, связывающие граничные оценки исходных и остаточных после вмешательства доз облучения с затратами на дезактивацию, эвакуацию и другие меры вмешательства;

- разработаны методы оценки оптимальных уровней остаточных после вмешательства доз облучения, которые верифицированы в ходе обоснования стратегий обеспечения радиационной безопасности для сценария крупной аварии с утечкой радиации на территории России.

**Объект и предмет исследования.** Объектом диссертационного исследования являются потери здоровья населения, обусловленные сверхфоновым радиационным облучением, затраты и выгоды, связанные с их снижением. Предметом исследования выступают статистические методы оценки радиационных рисков и эффективности мероприятий радиационной безопасности.

**Область исследования.** Результаты диссертационного исследования соответствуют пункту 4.11 «Методы обработки статистической информации: классификация и группировки, методы анализа социально-экономических явлений и процессов, статистического моделирования, исследования экономической конъюнктуры, деловой активности, выявления трендов и циклов, прогнозирования развития социально-экономических явлений и процессов» Паспорта специальностей ВАК по специальности 08.00.12 – Бухгалтерский учет, статистика.

**Теоретическая и методологическая основа исследования.** Теоретической и методологической основой исследования являются работы отечественных и зарубежных специалистов в области статистики, математической статистики, эконометрического моделирования и использования статистических методов для анализа и оценки эффективности мер по ликвидации последствий крупных радиационных аварий, оценки радиационных рисков, временных и стоимостных потерь здоровья населения вследствие воздействия ионизирующего излучения.

В процессе исследования использовались законодательные, нормативные и методические указания МКРЗ, МАГАТЭ, НКДАР ООН, ИБРАЭ РАН, Правительства РФ и ряда других отечественных и зарубежных организаций, занимающихся мониторингом радиационной безопасности населения.

**Информационная база исследования.** Информационную основу исследования составили:

– статистические базы данных по онкологической заболеваемости и смертности, содержащие результаты радиационно-эпидемиологических исследований крупных инцидентов, связанных с выбросом радиации, в частности, по когортам выживших после атомной бомбардировки в городах Хиросима и Нагасаки в 1945 году;

– социально-демографические характеристики населения, а также показатели онкологической заболеваемости и смертности в его различных половозрастных группах в регионах РФ, представленные на официальных сайтах Федеральной службы государственной статистики, Института демографии



Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» и в ежегодном статистическом сборнике «Злокачественные новообразования в России», публикуемом МНИОИ им. П.А. Герцена.

– статические материалы, характеризующие стоимость работ по ликвидации последствий радиоактивных загрязнений, в частности, оценки различных статей затрат, представленных в руководстве по управлению реабилитацией заселенных территории, загрязнённых вследствие радиационной аварии, разработанного в рамках интегрированного проекта EURANOS (Европейский подход к управлению радиологическими чрезвычайными ситуациями и стратегиями реабилитации, контракт № FI6R-CT-2004-508843)

**Методы исследования.** В ходе выполнения исследования использовались методы многомерного статистического анализа данных, эконометрического моделирования, теории вероятности и математической статистики. Для обработки данных использовались ППП «MSExcel», «Statgraphics» и «MathCad Prime».

**Научная новизна.** Разработаны методологические подходы и статистические процедуры оценки эффективности мероприятий по защите населения при аварийных ситуациях с утечкой радиации в малых дозах, базирующиеся на усовершенствованных эконометрических моделях «доза-эффект», учитывающих влияние на уровни радиационно обусловленных заболеваемости и смертности, наряду с дозой облучения, фоновых уровней этих явлений и половозрастных характеристик индивидуумов, и методах сопоставительного анализа затрат и выгод, связанных со снижением уровня радиационного воздействия на население.

Наиболее существенные результаты исследования, полученные лично автором и выдвигаемые на защиту, состоят в следующем:

– сформированы системы статистических показателей радиационных рисков, классифицированных по группам вероятностных, временных и стоимостных оценок потерь здоровья населения от воздействия ионизирующего излучения, и эффективности мероприятий радиационной безопасности, базирующиеся на сопоставлении выгод и издержек, связанных с их применением,

оцениваемых с учетом стоимости предотвращенной дозы облучения и остаточного уровня радиационного риска;

– разработаны базирующиеся на методах многомерного статистического анализа процедуры оценки усредненных по видам онкологических заболеваний параметров, включая частоту их проявления, продолжительность открытого и латентного периодов болезней и коэффициенты летальности, влияющих на уровень радиационных рисков;

– разработаны нелинейные модификации эконометрических моделей рисков смерти при облучении в малых дозах населения различного пола и возраста, с учетом факторов, отражающих усредненные онкологические последствия облучения;

– на основе авторских моделей «доза-эффект» получены уточненные по сравнению с оценками МКРЗ и НКДАР ООН возрастные распределения пожизненных радиационных рисков, временных и стоимостных потерь здоровья и жизни мужчин и женщин России и усредненные по всей популяции оценки этих показателей;

– разработаны подходы к оценке дозовых границ областей эффективного применения мер вмешательства (дезактивация территории, временная эвакуация населения и постоянное отселение с полной консервацией территории), базирующиеся на условии превышения связанных с ними выгод над затратами, и получены аналитические выражения, связывающие значения этих границ с уровнями рисков, обусловленных начальными и остаточными дозами облучения, и с затратами на вмешательство;

– с использованием усредненных по России экономических и демографических характеристик для гипотетического сценария загрязнения крупного промышленного города вследствие радиационной аварии обоснованы дозовые границы эффективного применения и нормативы пожизненных доз облучения для таких мер вмешательства как дезактивация, временная эвакуация населения и его постоянное отселение с полной консервацией территории;

– обоснованы нижние дозовые границы эффективного использования профилактики онкологических заболеваний среди ликвидаторов крупных техногенных аварий в течение последующей после облучения жизни с учетом дисконтирования ценности ее лет, стоимости медицинского обслуживания, зависимости онкологической смертности от стадии заболевания;

– разработаны методологические подходы к обоснованию оптимальных по остаточной дозе облучения стратегий ликвидации последствий радиационных аварий, базирующиеся на методах безусловной оптимизации с критериями на минимум остаточного для населения уровня радиационного риска и на максимум соотношения пользы и издержек их реализации с ограничениями по уровням предельно допустимых доз для населения и профессионалов.

**Теоретическая и практическая значимость диссертационного исследования.** Теоретическая значимость результатов диссертационного исследования заключается в развитии теории и методологии статистического оценивания:

– радиационных рисков с учетом особенностей их зависимости от дозы облучения, половозрастных характеристик населения и усредненных последствий онкологических заболеваний по признакам радиационно-обусловленной смертности, продолжительности открытого и латентного периодов болезней и их коэффициентам летальности;

– эффективности рискоснижающих мероприятий по ликвидации последствий крупных инцидентов с утечкой радиации на основе сопоставления связанных с ними выгод и затрат.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования его результатов Государственным санитарным-эпидемиологическим нормированием Российской Федерации при обосновании нормативов радиационной безопасности, а также МЧС России и другими ведомствами быстрого реагирования, занимающимися проблемами ликвидации последствий радиационных загрязнений, при планировании мероприятий по управлению радиационными рисками.

**Апробация и внедрение результатов исследования.** Основные научные положения и результаты работы докладывались и получили одобрение на Международных научно-практических конференциях «Статистические методы анализа экономики и общества» (Россия, г. Москва, НИУ «Высшая школа экономики, май 2013), «Modernization of Economics and Social Sphere in Russia and CIS Countries: Quantitative Research Methods» (ФГБОУ ВПО «РЭУ им. Г.В. Плеханова», декабрь 2013), «Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий (INFO-2014)» (г. Сочи, октябрь 2014), «Проблемы экономической и информационной безопасности социально-экономических систем» (ФГБОУ ВПО «РЭУ им. Г.В. Плеханова», Москва, ноябрь 2014).

Основные результаты диссертационного исследования используются в работе НО «Фонд экологической безопасности энергетики» для оценки радиационных рисков у населения Российской Федерации, что подтверждается справкой о внедрении.

Полученные в ходе диссертационного исследования результаты были апробированы в рамках участия в качестве исполнителя в грантах:

– «Риски жизнедеятельности: оценка и анализ региональных распределений» (№14-02-00437 А, РГНФ, 2014 г.);

– «Оценка и управление рисками потерь здоровья и жизни населения при чрезвычайных ситуациях с утечкой радиации» (№15-02-00412 А, РГНФ, 2015-2016 гг.).

**Публикации.** По теме диссертационного исследования опубликовано 10 печатных работ общим объемом 5,43 п.л. (из них авторские – 3,97 п.л.), в том числе 7 печатных работ в рекомендованных ВАК Минобрнауки России изданиях общим объемом 4,5 п.л. (из них авторские – 3,49 п.л.).

**Структура и объем диссертационной работы.** Работа состоит из введения, трех глав, заключения и выводов, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 186 страниц, включая 28 рисунков, 60 таблиц, список литературы из 140 наименований и приложение на 36 страницах.

## **Глава 1 Теоретико-методологические проблемы оценки радиационных рисков и эффективности мероприятий радиационной безопасности**

### **1.1 Социально-экономические последствия инцидентов, связанных с выбросом радиации**

Последние десятилетия характеризуются значительным ростом масштабов применения радиоактивных материалов в различных сферах народного хозяйства. В настоящее время физические свойства ионизирующего излучения активно используются в медицине, химии, биологии, генетике, сельском хозяйстве и многих других сферах науки и производства [15]. Наибольшее свое применение радиоактивные вещества нашли в энергетической отрасли. Постоянно возрастающие масштабы глобальной экономики обуславливают устойчивый рост спроса на энергетические ресурсы, и рождают проблему поиска их новых источников. Многими специалистами атомная энергия рассматривается как наиболее перспективное решение этой проблемы на многие годы вперед, что предопределяется, в первую очередь, рядом неоспоримых ее преимуществ по сравнению с другими отраслями:

- себестоимость выработки электроэнергии посредством атомных электростанций является одной из самых низких и уступает в этой части только гидроэлектростанциям;

- производство энергии в атомной отрасли является практически безотходным и не наносит никакого вреда окружающей среде (в отличие от тепловых станций, где выбросы от сгорания угля и нефтепродуктов являются весьма существенными), а уровень радиационного фона в городах, расположенных вблизи АЭС, не превышает естественный;

- твердая форма (при нормальных условиях), а также энергетическая насыщенность радиоактивных материалов (1 см<sup>3</sup> урана имеет энергетическое содержание, эквивалентное 60000 л бензина, 110-160 т угля и около 60000 м<sup>3</sup> природного газа) делает их транспортировку самой удобной среди энергоресурсов

и позволяет осуществлять строительство АЭС в любой точке земного шара, в отличие от ГЭС, для строительства которых требуется наличие огромных массивов водных ресурсов (рек);

- разведанных запасов урана, при условии его использования в открытом топливном цикле, хватит более чем на 2000 лет, а с развитием ядерной физики и возможностью реализации закрытого топливного цикла, этот период увеличится до 10000 лет [38].

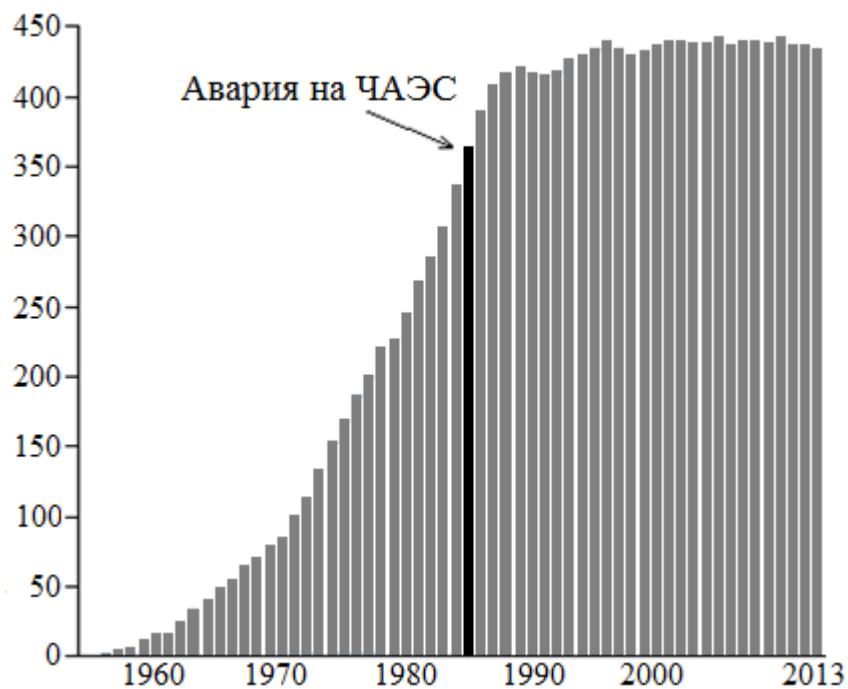


Рис. 1.1 Количество действующих энергоблоков в атомных электростанциях по всему миру [110]

Однако, несмотря на очевидные достоинства атомной энергетики, в последнее двадцать пять лет строительство новых АЭС в мире резко сократилось. Авария на Чернобыльской АЭС в 1986 г. в корне изменила отношение мирового сообщества к проблемам радиационной безопасности, что, в определенной степени, негативно повлияло на развитие атомной промышленности во многих развитых странах (рисунок 1.1) [110]. Решение проблем радиационной безопасности базируется на оценках воздействия радиационного излучения на организм человека, которые в настоящее время характеризуются значительной

неопределенностью, особенно при облучении в малых дозах (до 100-200 мЗв/год) [103]. Как показали результаты измерений последствий крупных радиационных аварий, именно такие дозы получает большинство населения, проживающего в зонах загрязнения. Недостоверность оценок последствий облучения при таких дозах значительно усложняет организацию мероприятий радиационной безопасности при аварийных утечках радиации и оценку их эффективности.

Согласно современным рекомендациям МКРЗ система безопасности жизнедеятельности населения на загрязненных территориях базируется на принципе ALARA (as low as reasonably achievable), который дословно трактуется как необходимость снижения рисков для здоровья населения до такого низкого уровня, насколько это разумно достижимо [72]. С точки зрения рисков в сфере радиационной безопасности, фактически это означает, что при определении оптимального комплекса мер по снижению последствий радиационных аварий, следует применять те из них, которые гарантируют максимальную безопасность населению, но при соблюдении условия того, что польза от таких мер должна превышать затраты на их реализацию (принципы обоснования и оптимизации, предложенные МКРЗ [44,108]). Однако на практике, если расчет уровня затрат и расходов на проведение рискоснижающих мероприятий не представляется трудновыполнимой задачей, то оценить их пользу весьма проблематично (в данном случае польза от рискоснижающих мер подразумевает стоимостной эквивалент человек-лет жизни населения, которые удалось сохранить при их реализации).

На оценку эффективности рискоснижающих мероприятий также существенно влияет тот факт, что издержки на их проведение, как и для любых других мероприятий связанных с экологией, весьма высоки. По данным работы [7] средняя стоимость спасения одной жизни в год за счет экологических мероприятий в США составляет 4,2 млн. долл. США, что во много раз превышает затраты на медицинские мероприятия, например, такие как снижение бытового травматизма (35 тыс. долл. США) или уровня профзаболеваний (350 тыс. долл. США). В сфере радиационной безопасности уровень издержек на проведение

рискоснижающих мероприятий в большей степени зависит от регламентируемого органами надзора норматива допустимого предела дозы облучения населения. Согласно исследованиям Американской Тихоокеанской Северо-Западной Национальной Лаборатории уровень издержек на проведение защитных мер при рассмотрении гипотетического сценария подрыва в Нью-Йорке «грязной бомбы» активностью 10000 Ки, содержащей изотоп Цезий-137, варьируется в диапазоне от 100 до 4500 млрд. долл. США в зависимости от выбора допустимой дозы облучения (рис 1.2) [124]. Такой рост затрат при ужесточении ограничений реабилитации территории является проявлением общего «закона снижающейся отдачи» вложений в очистку окружающей среды. В этой связи выбор значений допустимых доз облучения населения является основополагающим критерием в области обеспечения радиационной безопасности, при установлении которого необходимо учитывать пользу от применения радиоактивных материалов, социально приемлемые уровни рисков безопасности жизнедеятельности и уровни затрат, необходимые для их поддержания.

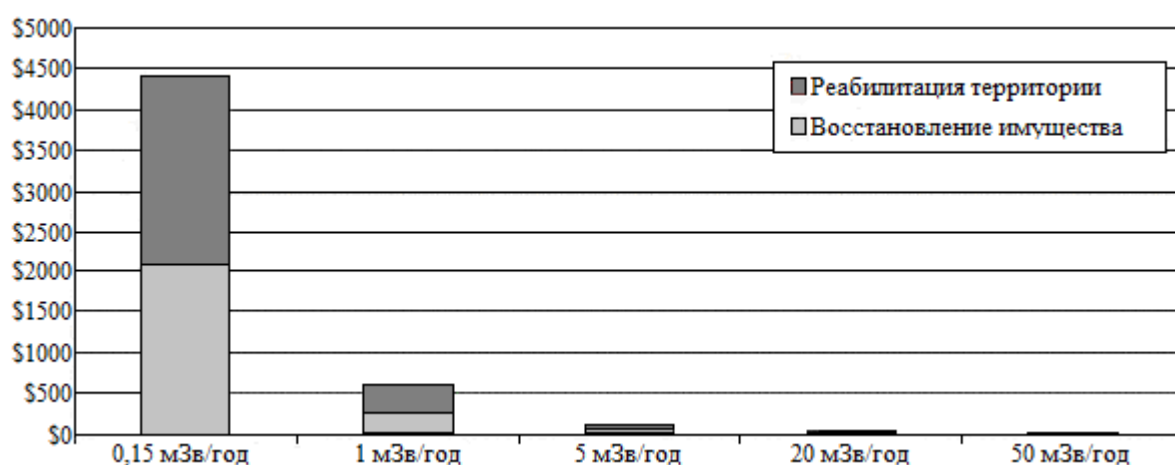


Рис. 1.2 Составляющие экономического ущерба в зависимости от величины критерия реабилитации для гипотетического сценария подрыва в Нью-Йорке «грязной бомбы» активностью 10000 Ки, содержащей Cs-137 (млрд. дол.) [124]

В то же время, на сегодняшний день нормативы радиационной безопасности при аварийных ситуациях, рекомендованные международными агентствами, определены достаточно размыто. Согласно им допустимыми дозами



облучения населения при аварийных утечках радиации считаются дозы до 20 мЗв/год. При облучении от 20 до 100 мЗв/год решения о применении защитных мер для населения остаются на усмотрение местных органов управления и при дозах свыше 100 мЗв/год применение защитных мер строго обязательно. В связи с этим многими специалистами отмечается, что на практике, в отсутствие строгих регламентаций по устранению последствий аварийных ситуациях, правительствами стран зачастую переоцениваются негативные последствия воздействия радиации при малых дозах облучения, и это, как следствие, приводит к принятию экономически необоснованных решений. Преувеличение радиационной опасности имело место, например, в Японии, после аварии на АЭС «Фукусима-1». Его следствием стало переселение 70-100 тыс. человек из зон, при проживании в которых не ожидалось сколь-нибудь заметного роста смертности по сравнению с фоновым уровнем. В свою очередь, экономические потери, связанные с таким переселением, в сотни раз превышает реальный положительный эффект здоровью жителей [1].

Переоценка радиационной опасности, помимо чрезмерных необоснованных экономических потерь, может также нанести серьезный социальный вред, последствиями которого также является опосредованный, но реальный ущерб здоровью населения [40,42,43,56]. По мнению некоторых специалистов, именно такой вред принесло постановление правительств Украины и Белоруссии об эвакуации и перемещении в 1990-1991 гг. более 52 тысяч лиц из областей, в которых средние эффективные годовые дозы облучения от последствий аварии на ЧАЭС в 1986-1995 гг. находились в пределах 6-25 мЗв. В этих областях средние дозы, полученные населением в течение всей жизни от воздействия техногенной радиации, составляли бы 210 мЗв [83]. Для сравнения, заметим, что среднемировая индивидуальная эффективная доза из-за естественного радиационного фона находится приблизительно на уровне 250 мЗв, а в некоторых областях земного шара она достигает 1000 мЗв. В этой связи отмечается, что потери от такого переселения, обусловленные беспокойством,

психосоматическими заболеваниями, депрессией, самоубийствами, могли значительно превысить ущерб здоровью населения от полученной дозы [111].

Таким образом, проведение защитных мер в области радиационной безопасности должно базироваться на достоверных оценках рисков причинения ущерба здоровью и жизни населения от радиационного воздействия в малых дозах облучения. Ошибки в их значениях могут значительно снизить эффективность мер, применяемых для устранения последствий облучения и защиты населения от воздействия радиационного облучения [87,104].

Неразработанность методологических подходов к оценке радиационных рисков при малых дозах облучения предопределяет актуальность проведения более глубоких исследований в этой сфере научной деятельности [2,24,52,67]. Результаты таких исследований имеют важное значение для Российской Федерации [59]. Об этом говорится и в указе президента РФ, утвержденного 7 июня 2011 года [76]. Развитие ядерной энергетики в настоящее время является одним из самых приоритетных направлений в стране. На сегодняшний день российская атомная отрасль занимает лидирующие позиции в мире по опыту строительства и эксплуатации АЭС. Госкорпорацией «Росатом» осуществляется возведение 8 новых АЭС на территории России, а также имеются контракты на строительство АЭС с Турцией, Китаем, Ираном, Финляндией и многими другими странами по всему миру [4]. В этой связи повышение обоснованности и эффективности систем обеспечения радиационной безопасности объектов атомной энергетики является важным условием ускорения темпов развития этой отрасли, как и экономики страны в целом [54,58,63].

## **1.2 Особенности воздействия ионизирующего излучения на организм человека**

Впервые о негативных последствиях радиационного воздействия на организм человека стало известно в начале XX века, в связи с участвовавшими случаями лучевых ожогов и гибели среди рентгенологов в результате лучевого поражения. Для организации защиты от этого воздействия в 1928 г. в

соответствии с решением Второго Международного конгресса по радиологии был создан комитет, в то время получивший название «Международного Комитета по защите от рентгеновского излучения и излучения радия» (IXRPC), который позднее в 1950 г. был реорганизован и переименован в Международную комиссию по радиационной защите (МКРЗ) [44]. Его деятельность, в частности, первоначально была связана с выработкой рекомендаций по нормированию уровня радиационного воздействия, в первую очередь, для профессионалов (рентгенологов). После бомбардировки Японских городов, с развитием ядерной энергетики и первых радиационных аварий нормативы радиационной безопасности стали также рассчитывать для персонала потенциально опасных ядерных объектов и населения.

Нормативная база радиационной безопасности совершенствовалась вместе с развитием понимания природы радиационной опасности в большом числе медико-биологических исследований и в натуральных обследованиях пострадавших от излучений работников и населения. Прежде всего, оказалось, что накопление радиации в организме у индивидуума сопровождается ростом рисков проявления неблагоприятных последствий для его здоровья. Возникло представление о накопленной дозе как об аддитивной величине. Была выявлена и двоякая природа радиационного воздействия на человека и животных. Некоторые эффекты обнаруживались практически сразу после облучения при превышении определённых порогов (детерминированные, пороговые эффекты – например, формы лучевой болезни, лучевые ожоги, катаракта хрусталика глаза), а степень их тяжести напрямую зависела от поглощенной дозы облучения. При незначительных дозах облучения некоторые эффекты могли проявиться случайно через много лет с вероятностью, зависящей от дозы (стохастические, вероятностные эффекты – раковые заболевания, наследственные генетические эффекты). В современном представлении у таких эффектов нет пороговых значений доз, и теоретически они могут проявляться при сколь угодно малой дозе облучения.

Также стало известно, что эффекты зависят не только от дозы облучения, но и от мощности дозы, то есть величины дозы в единицу времени. Первоначально радиационная опасность связывалась с мощностью экспозиционной дозы, измеряемой по степени ионизации воздуха излучением (рентген или кулон/кг в единицу времени). Исследования с облучением живых тканей показали, что биологический эффект (ущерб) на клеточном уровне пропорционален поглощённой в единице веса ткани энергии. Это обусловило выбор поглощённой дозы в качестве инструментальной основы для представления нормативов радиационной безопасности. Единицей её измерения в СИ является Грэй (Дж/кг). Медико-биологические исследования выявили, что эффект облучения зависит от типа излучения, поэтому поглощённую дозу пересчитывают в эквивалентную дозу с весовыми коэффициентами по типам излучения из специальной таблицы эквивалентности (Приложение 1.1, таблица П.1.1). Оказалось так же, что органы и ткани отличаются радиочувствительностью [55,108], то есть одна и та же поглощённая в них доза вызывает разный биологический эффект. Для оценки результирующего эффекта и меры риска отдалённых последствий облучения всего тела и отдельных органов была предложена эффективная доза. Единица её измерения в СИ – Зиверт (Зв). Внесистемная единица – Бэр ( $1\text{Зв}=100\text{Бэр}$ ). Для всего тела эффективная доза рассчитывается как взвешенная коэффициентами радио-чувствительности органов (Приложение 1.1, таблица П.1.2) сумма поглощённых в органах эквивалентных доз. Таблицы радио-чувствительности органов и таблицы эквивалентности излучений постоянно уточняются по итогам исследований. Эффективная доза, в единицах которой формулируются основные нормы облучения, является не измеримой, но расчётной величиной, наиболее адекватно рассчитываемой на фантомных компьютерных моделях [108].

Детерминированные эффекты у пострадавших от сильного однократного облучения изучены достаточно хорошо. Они проявляются через несколько часов или дней после облучения в виде головной боли, головокружения, тошноты, рвоты, лихорадки (симптомы лучевой болезни). Эти эффекты возникают в среднем при поглощённых за короткий срок дозах от 1 Гр на все тело (таблица

1.1). Установлены и степени их тяжести в зависимости от полученной эквивалентной дозы: при дозах от 100 до 200 Бэр (от 1 до 2 Зв) – легкая степень лучевой болезни; от 200 до 400 Бэр (от 2 до 4 Зв) – средняя степень лучевой болезни; от 400 до 600 Бэр (от 4 до 6 Зв) – тяжелая степень лучевой болезни; более 600 Бэр (более 6 Зв) – крайне тяжелая степень лучевой болезни [18]. Однако на практике столь высоким дозам подвержены в основном ликвидаторы крупных техногенных аварий и больные, проходящие лучевую терапию. Поэтому основной интерес у исследователей вызывает оценка отсроченных во времени стохастических эффектов от воздействия «средних» (от 200 до 1000 мГр) и «малых» доз ионизирующего излучения, которому подвергается большинство жителей при крупных техногенных авариях.

Таблица 1.1

Уровни облучения, при которых необходимо срочное медицинское вмешательство [46]

Орган и ткань	Поглощенная доза в органе или ткани за 2 суток, Гр
Все тело	1
Легкие	6
Кожа	3
Щитовидная железа	5
Хрусталик глаза	2
Гонады	3
Плод	0,1

Главной особенностью биологического воздействия ионизирующего излучения на клетки является его способность к возбуждению или ионизации атомов биосистем [39,66]. Этот процесс, даже при самых маленьких поглощенных дозах, неизбежно способствует изменению атомов и молекул в организме человека и, таким образом, появлению возможности повреждения клетки. При этом, большинство изменений являются временными и не вызывают ее гибели. И только ионизация гигантской молекулы ДНК, несущей в себе всю генетическую информацию, может привести к потере клеткой способности к неограниченному делению (репродуктивная гибель). Однако потеря нескольких и даже многих

клеток не влияет на функции большинства органов и тканей. И только резкое сокращение количества делящихся в них клеток, необходимых для жизнедеятельности организма, может вызвать потерю их функций и, как следствие, гибель организма.

Ионизирующее излучение не только повреждает наследственный механизм клетки, но и может вносить изменения в хромосомном аппарате, которые приводят к радиационным мутациям, и способствует появлению клеток с новыми качествами [5]. Мутации, развивающиеся в половых клетках, не отражаются на состоянии облученного организма, но могут проявиться в следующих поколениях, а это может вести к увеличению числа наследственных болезней. В результате, предполагается, что радиационное воздействие на организм человека может лежать в основе нарушений нервной, кроветворной, эндокринной, иммунной и других систем организма, а также способствовать развитию онкологических и наследственных заболеваний [39].

Однако данные предположения специалистов не находят подтверждения в статистике радиационно-эпидемиологических исследований последствий крупных аварий. В частности, Научный комитет ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН) и МКРЗ пришли к выводу, что доказано только два основных вида стохастических эффектов облучения: развитие рака у облученного индивида и наследуемые нарушения у потомства. При этом важно отметить, что если возможность индукции злокачественных опухолей у облученных людей является научно доказанным фактом, то наследственный эффект не имеет в настоящее время прямых научных подтверждений и включен в перечень стохастических эффектов МКРЗ в целях исключения возможной недооценки, так как имеются данные о наличии таких эффектов у других биологических объектов: растений, клеточных культур, микроорганизмов, мелких лабораторных животных [6].

Таким образом, к научно обоснованным проявлениям радиационного риска при «средних» и «малых» дозах облучения специалисты относят только увеличение онкологической заболеваемости и смертности. Однако количественно

оценить величину радиационно-обусловленной смертности (установить радиационную причину рака) медицинским путем на сегодняшний день не представляется возможным. В связи с этим исследователями используется статистический подход, в основе которого лежит сопоставление онкологической заболеваемости и смертности, средней продолжительности жизни в когортах облученного и необлученного населения. Полученные подобным путем оценки радиационных рисков на основе анализа последствий крупных происшествий, связанных с распространением радиации, признаются многими международными агентствами в качестве количественной меры радиационного риска и используются для разработки рекомендаций и нормативов радиационной безопасности.

### **1.3 Система показателей радиационного риска и эффективности мероприятий радиационной безопасности**

При изучении влияния фактора среды, в том числе радиационного, на здоровье человека обычно используют понятие «риска», которое характеризует степень опасности воздействия в количественных показателях [13,69]. В общем виде система показателей, используемая для количественной оценки радиационного риска, классифицируется на следующие 3 группы:

- 1) Вероятностные показатели;
- 2) Натуральные показатели;
- 3) Стоимостные показатели.

Вероятностные показатели используются при оценке всех видов рисков безопасности жизнедеятельности. Как правило, они определяются в виде частоты проявления негативного события в некоторой исследуемой группе за определенный промежуток времени. Если имеется зависимость между этой частотой и интенсивностью воздействия фактора риска, то сопоставляя ее с приемлемыми обществом уровнями рисков, на практике определяются нормы безопасности и нормативы допустимого воздействия данного фактора риска [68].

При оценке воздействия фактора радиации используют **вероятностные показатели** избыточного абсолютного и относительного рисков. Избыточный абсолютный риск представляет собой разницу между частотой появления конкретного стохастического эффекта, наблюдаемого в исследуемой группе, и частотой появления этого эффекта в группе сравнения [60]. Избыточный относительный риск – это разность числа наблюдаемых и ожидаемых событий заболевания (смерти), отнесенная к числу ожидаемых событий заболевания (смерти) в отсутствие изучаемого фактора воздействия. Если избыточный абсолютный или относительный риск равен нулю, то это свидетельствует об отсутствии различий в показателях заболеваемости (смертности) между сравниваемыми группами; если показатели превышают значение ноль, то это говорит о наличии негативного воздействия фактора радиации на здоровье населения [69]. В научной литературе эти показатели принято обозначать EAR (*excess absolute risk*) и ERR (*excess relative risk*).

Для расчетов избыточного абсолютного и относительного риска необходимо ввести следующие обозначения. Пусть  $O_z(D)$  – количество диагностированных случаев заболевания (смерти) по причине  $z$  (в данном случае вида онкологического заболевания) в исследуемой группе, облученной в диапазоне доз  $D$ ;  $E_z(D)$  – ожидаемое количество случаев заболевания (смерти) по причине  $z$  в этой группе, если принять коэффициент заболеваемости (смертности) в ней равным фоновому значению (коэффициенту заболеваемости (смертности) в группе сравнения). Таким образом, исходя из определения избыточного относительного риска, эта величина по каждой причине  $z$  рассчитывается следующим образом [134]:

$$ERR_z(D) = \frac{O_z(D) - E_z(D)}{E_z(D)}. \quad (1.1)$$

Если обозначить  $N_I(D)$  – численность облученного населения в исследуемой когорте со средней дозой облучения  $D$ ,  $h_I(D)$  – коэффициент заболеваемости (смертности) по причине  $z$  в этой когорте,  $h_0$  – коэффициент заболеваемости



(смертности) по причине  $z$  в группе сравнения, то выражение (1.1) можно преобразовать следующим образом:

$$ERR_z(D) = \frac{O_z(D) - E_z(D)}{E_z(D)} = \frac{N_1(D) \cdot h_1(D) - N_1(D) \cdot h_0}{N_1(D) \cdot h_0} = \frac{h_1(D)}{h_0} - 1. \quad (1.2)$$

В свою очередь показатель избыточного абсолютного риска определяется как разность между показателями заболеваемости (смертности) по причине  $z$  в облученной и необлученной группах [34]:

$$EAR_z(D) = h_1(D) - h_0. \quad (1.3)$$

Часто на практике, для сопоставления уровней риска в различных диапазонах доз, используют показатели риска на единицу дозы (поглощенную или эквивалентную). В этом случае значение избыточного относительного риска на единицу дозы рассчитывается как:

$$ERR_{13e/1Гр}(D) = \frac{h_1(D) - h_0}{h_0 \cdot \bar{D}}, \quad (1.4)$$

где  $\bar{D}$  – среднее значение поглощенной (Гр) или эквивалентной (Зв) дозы в дозовой группе  $D$ ; а значение избыточного абсолютного риска на единицу дозы [134]:

$$EAR_{13e/1Гр}(D) = \frac{h_1(D) - h_0}{\bar{D}}. \quad (1.5)$$

Располагая более подробной статистикой, для выявления особенностей радиационного воздействия на различные группы населения, показатели избыточного абсолютного и относительного риска также рассчитывают для жителей различных регионов, пола и возраста:

$$ERR_z(e, s, c, D, a(y)) = \frac{h_1(e, s, c, D, a(y))}{h_0(e, s, c, a(y))} - 1, \quad (1.6)$$

$$EAR_z(e, s, c, D, a(y)) = h_1(e, s, c, D, a(y)) - h_0(e, s, c, a(y)), \quad (1.7)$$

где  $h_1(e, s, c, D, a(y))$  – показатель заболеваемости (смертности) по причине  $z$  за период с момента облучения до календарного года  $y$  ( $a(y)$  – возраст, которого достигнет данная половозрастная группа в календарном году  $y$ ) у лиц, находящихся на момент облучения в возрасте  $e$ , принадлежащих дозовой группе

$D$ , постоянно проживающих на территории  $c$ , пола  $s$ ,  $h_0(e,s,c,a(y))$  – фоновая заболеваемость (смертность) по причине  $z$  (в группе сравнения) в диапазоне лет от  $e$  до  $a(y)$  у лиц, постоянно проживающих на территории  $c$ , пола  $s$  [136].

В свою очередь показатели  $ERR$  и  $EAR$  на единицу поглощенной или эквивалентной дозы с учетом факторов пола, возраста и региона постоянного проживания определяются следующим образом:

$$ERR_{136/1Гр}(e, s, c, D, a(y)) = \frac{h_1(e, s, c, D, a(y)) - h_0(e, s, c, a(y))}{h_0(e, s, c, a(y)) \cdot \overline{D(e, s, c)}}, \quad (1.8)$$

$$EAR_{136/1Гр}(e, s, c, D, a(y)) = \frac{h_1(e, s, c, D, a(y)) - h_0(e, s, c, a(y))}{\overline{D(e, s, c)}}, \quad (1.9)$$

где  $\overline{D(e, s, c)}$  – среднее значение поглощенной или эквивалентной дозы у лиц, находящихся на момент облучения в возрасте  $e$ , принадлежащих дозовой группе  $D$ , постоянно проживающих на территории  $c$ , пола  $s$ .

Информация об уровне заболеваемости (смертности) по всем причинам  $z$  в различных регионах и половозрастных группа позволяет уточнить усредненную оценку  $ERR_{136/1Гр}(D)$  для всего населения на основе следующего выражения:

$$ERR_{136/1Гр}(D) = \frac{\sum_{e,s,c,D_i} O_z(e, s, c, D_i, a(y)) - \sum_{e,s,c,D} E_z(e, s, c, D_i, a(y))}{\sum_{e,s,c,D_i} E_z(e, s, c, D_i, a(y)) \cdot \overline{D_i(e, s, c)}}, \quad (1.10)$$

где  $O_z(e,s,c,D,a(y))$  – количество диагностированных случаев заболевания (смерти) по причине  $z$  за период с момента облучения до календарного года  $y$  у лиц, находящихся на момент облучения в возрасте  $e$ , принадлежащих дозовой группе  $D$ , постоянно проживающих на территории  $c$ , пола  $s$ ;  $E_z(e,s,c,D,a)$  – ожидаемое количество случаев заболевания (смерти) по причине  $z$ , если в облученной когорте коэффициент заболеваемости (смертности) принять равным фоновому значению (как в группе сравнения) у лиц в диапазоне лет от  $e$  до  $a(y)$ , постоянно проживающих на территории  $c$ , пола  $s$ ;  $D_i$  – более мелкие разбиения диапазона доз  $D$ .

Ряд значений  $ERR_{136/1Гр}(e,s,c,D_i,a(y))$  позволяет определить распределение и доверительные интервалы оценки  $ERR_{136/1Гр}(D)$ . Для расчета ее статистической

значимости на практике используют распределение Бернулли. Пусть  $N$  – общее число зарегистрированных случаев онкологических заболеваний (смертей) в облученных и необлученных группах в статистическом исследовании,  $p$  – доля облученных лиц. Предполагается, что количество диагностируемых случаев заболеваний (смерти)  $O$  в контрольной группе является случайной величиной с математическим ожиданием  $M(O)$  и дисперсией  $V$ , которые равны [135]:

$$M(O) = Nq, \quad V = Nq(1 - q), \quad \text{где} \quad q = \frac{p(1 + ERR_{136/1\Gamma p}(D) \cdot \bar{D})}{1 + ERR_{136/1\Gamma p}(D) \cdot \bar{D} \cdot p}. \quad (1.11)$$

При больших значениях выборки  $N$ , показатель  $O$  имеет нормальное распределение. В этом случае, статистическую значимость оценки  $ERR_{136/1\Gamma p}(D)$  можно оценить с помощью таблицы стандартного нормального закона распределения. В частности, если этот показатель статистически незначим (близок к 0), то из выражения (1.11) следует, что  $q=p$ . В таком случае математическое ожидание  $O$  будет равно значению  $E=Np$ , а дисперсия  $V_0=Np(1-p)$ . Для того чтобы оценка  $ERR_{136/1\Gamma p}(D)$  считалась статистически значимой, значение  $q$  должно существенно превышать значение  $p$ . В связи с этим рассчитывается критериальное значение  $T_{крит}$  равное [135]:

$$T_{крит} = \frac{N \cdot (q - p)}{\sqrt{Np(1 - p)}}. \quad (1.12)$$

Если значение  $T_{крит}$  превышает табличное значение  $T_{табл}$ , где  $T_{табл}$  – квантиль стандартного нормального закона распределения с заданной вероятностью  $p$ , то говорят, что оценка  $ERR_{136/1\Gamma p}(D)$  статистически значима с доверительной вероятностью  $p$ .

К вероятностным показателям оценки радиационного риска относят также величину пожизненного радиационного риска. Эта величина показывает вероятность смерти от радиационно-обусловленного рака в течение всех последующих после облучения лет жизни индивидуума. В докладе НКДАР ООН 1988 пожизненный радиационный риск обозначают *REID* (*risk of exposure-induced death*) и предлагают рассчитывать следующим образом:

$$REID(e, s, c, D) = \int_e^{A_l} ((h_1(e, s, c, D, A) - h_0(s, c, A)) \cdot S(s, c, A|D, e)) dA, \quad (1.13)$$

где  $h_1(e, s, c, D, A)$  – вероятность смерти от онкологических заболеваний индивидуума, проживающего в регионе  $c$ , пола  $s$  в возрасте  $A$ , при условии, что в возрасте  $e$  он был облучен эквивалентной (поглощенной) дозой  $D$ ;  $h_0(s, c, A)$  – фоновая онкологическая смертность среди индивидуумов, проживающих в регионе  $c$ , пола  $s$ , в возрасте  $A$ ;  $S(s, c, A|D, e)$  – коэффициент естественного дожития индивидуума, проживающего в регионе  $c$ , пола  $s$ , от возраста  $A$  до  $A+1$ , при условии, что в возрасте  $e$  он получил эквивалентную (поглощенную) дозу  $D$ ,  $A_l$  – верхний возрастной предел [132].

Усредненную оценку пожизненного радиационного риска для всей исследуемой группы можно оценить на основе следующего выражения:

$$REID = \frac{\sum_{s,c,D,e} REID(e, s, c, D) \cdot N(e, s, c, D)}{\sum_{s,c,D,e} N(e, s, c, D)}, \quad (1.14)$$

где  $N(e, s, c, D)$  – численность людей в исследуемой когорте, проживающих в регионе  $c$ , пола  $s$ , облученных в возрасте  $e$  эквивалентной (поглощенной) дозой  $D$ .

В пересчете на 1 единицу дозы пожизненный радиационный риск рассчитывается следующим образом:

$$REID_{136/1Гр} = \frac{REID}{D}. \quad (1.15)$$

В докладах BEIR IV и V предлагается преобразованная оценка пожизненного радиационного риска, которая обозначается ELR (*excess life time risk*) и определяется согласно следующему выражению:

$$ELR(e, s, c, D) = \int_e^{A_l} h_1(e, s, c, D, A) \cdot S(s, c, A|D, e) dA - \int_e^{A_l} h_0(s, c, A) \cdot S(s, c, A) dA \quad (1.16)$$

где  $S(s, c, A)$  – коэффициент естественного дожития среди жителей региона  $c$ , пола  $s$  от возраста  $A$  до  $A+1$  [101,119].

**Натуральные показатели** характеризуют среднюю временную потерю лет жизни индивидуума, обусловленную воздействием ионизирующего излучения. На

основе этих показателей, в том числе, определяются и экономические потери государства по причине снижения продолжительности жизни населения, вызванным воздействием радиации. В статистических исследованиях оценивают величину ожидаемой потери человек-лет жизни в исследуемой когорте (*LLE – life lost expectancy*). Эта величина рассчитывается как для оценки средней индивидуальной величины потерь лет жизни человека, так и для оценки потерь человек-лет жизни группы облученных людей. Согласно методике НКДАР ООН индивидуализированный риск определяется следующим образом:

$$LLE(e,s,c,D) = \int_e^{A_i} S(s,c,A)dA - \int_e^{A_i} S(s,c,A|D,e)dA, \quad (1.17)$$

где  $LLE(e,s,c,D,e)$  – ожидаемая потеря человек-лет жизни индивидуума, обусловленная радиационным воздействием, проживающего в регионе  $c$ , пола  $s$ , облученного в возрасте  $e$  эквивалентной (поглощенной) дозой  $D$  [132].

В свою очередь величина ожидаемой потери человек-лет жизни для всей группы людей рассчитывается как:

$$LLE = \sum_{s,c,D,e} LLE(e,s,c,D) \cdot N(e,s,c,D), \quad (1.18)$$

В пересчете на одну единицу коллективной дозы (чел.-Зв или чел.-Гр) величина ожидаемых потерь человек лет жизни населения ( $LLE_{136/1Гр}$ , чел.-лет/чел.-Зв или чел.-лет/чел.-Гр), обусловленных радиационным воздействием, определяется следующим образом:

$$LLE_{136/1Гр} = \frac{\sum_{s,c,D,e} LLE(e,s,c,D) \cdot N(e,s,c,D)}{\sum_{s,c,D,e} N(e,s,c,D) \cdot D(e,s,c)}, \quad (1.19)$$

В качестве **стоимостного показателя** оценки радиационного риска используют величину стоимостного эквивалента потерь здоровья населения, обусловленных радиационным воздействием. На практике, как правило, для ее расчета устанавливается норматив причинения ущерба населению за каждый 1 чел.-Зв коллективного облучения ( $VE$ , руб./чел.-Зв или долл. США/чел.-Зв). Этот норматив МКРЗ предлагает определять на основе доходного метода,

согласно которому величина стоимостного эквивалента потери 1 чел.-года жизни населения должна устанавливаться на усмотрение местных органов управления, но в размере не менее 1 годового душевого национального дохода [44]. В связи с этим  $VE$  можно представить следующим образом:

$$VE = k \cdot НД \cdot LLE_{136/1Гр}, \quad (1.20)$$

где  $НД$  – национальный доход на душу населения (руб./год или долл. США/год);  $k$  – коэффициент перехода от временного показателя потерь здоровья к стоимостному, установленного нормативными документами федерального уровня ( $k \geq 1$ ).

Влияние среднедушевого национального дохода на стоимостный эквивалент потерь здоровья населения приводит к тому, что норматив  $VE$  будет значительно варьироваться в зависимости от экономических возможностей страны и принимать большие значения в странах с наибольшим ресурсным потенциалом.

Совокупный стоимостный ущерб здоровью населения в исследуемой группе от радиационного воздействия оценивается как произведение нормативного значения  $VE$  на коллективную дозу облучения населения. Таким образом, основными данными при оценке всех показателей радиационных рисков являются дозы облучения населения.

Показатели радиационного риска используют как основу в оценках эффективности и обоснованности мероприятий, применяемых для его снижения при чрезвычайных ситуациях с утечкой радиации. В общем виде мероприятия радиационной безопасности делят на две группы: мероприятия предотвращения радиационных аварий (повышение степени защищенности объектов атомной промышленности, контроль распространения радиоактивных материалов и т. п.) и мероприятия по ликвидации последствий радиационных аварий (дезактивация загрязненных территорий, укрытие населения в безопасных зонах и другие) [81]. Совершенствование надежности объектов атомной промышленности является необходимым условием их функционирования и развития как объектов мировой энергетической системы. Эта тематика активно прорабатывается в рамках

решения проблем проектирования и строительства таких объектов [36]. Однако она не входит в круг вопросов, рассматриваемых в данном исследовании. Его тематика связана с проблемами обоснования мероприятий по ликвидации последствий радиационных аварий.

В научной и методической литературе до сих пор не получено однозначного ответа по поводу путей решения этой проблемы. В руководствах по разработкам стратегии обеспечения радиационной безопасности в аварийных ситуациях рекомендовано при оценках их эффективности использовать два основных показателя: издержки и польза от ее реализации защитных мероприятий. Издержки от их проведения включают в себе прямые затраты и косвенные потери, которые рассчитываются статистическими, аналитическими и эконометрическими методами. Пользу от проведения рискоснижающих мероприятий рекомендуется увязывать с величиной предотвращенной каждым мероприятием дозой облучения, которая напрямую влияет на стоимостные оценки предотвращенных потерь населения, а также на оценки других предотвращенных потерь, например, связанных с сокращением периода прекращения хозяйственной деятельности на загрязненной территории. В стоимостном выражении пользу определяют следующим образом:

$$Q^+ = VE \cdot \Delta D \cdot N, \quad (1.21)$$

где  $\Delta D$  – средняя предотвращенная индивидуальная доза среди жителей, проживающих на загрязненной территории (Зв),  $N$  – количество жителей, проживающих на загрязненной территории (чел.).

Средняя предотвращенная индивидуальная доза облучения представляет собой разность между ожидаемой накопленной дозой облучения индивида за время  $t_a$  в случае если не предпринимать никаких мер по снижению уровня радиации и ожидаемой накопленной дозой облучения индивида за этот же период при осуществлении меры вмешательства. Данную величину рассчитывают согласно следующему выражению:

$$\Delta D = \int_0^{t_a} (D(t) - D_R(t)) dt, \quad (1.22)$$

где  $D(t)$  – функция изменения ожидаемой дозы облучения в зависимости от времени  $t$ , прошедшего с момента аварии, без проведения рискоснижающих мероприятий (на практике, как правило, измеряется в мкЗв/час);  $D_R(t)$  – функция изменения ожидаемой дозы облучения населения в зависимости от времени, прошедшего с момента аварии, при проведении рискоснижающих мероприятий;  $t_a$  – горизонт планирования (лет), соответствующий ожидаемой продолжительности жизни среднего по возрасту индивида.

Несложно заметить, что через предотвращенную дозу можно оценить и предотвращенные радиационные риски.

Согласно рекомендациям МКРЗ, меру вмешательства можно считать эффективной (экономически обоснованной), если польза для населения от снижения дозы облучения ( $Q^+$ ) превышает издержки от ее реализации ( $Q^-$ ), то есть выполняется следующее соотношение:

$$Q^+(D) - Q^-(D) \geq 0 \quad (1.23)$$

Заметим, что польза и издержки в выражении (1.23) зависят от дозы облучения. С учетом этого эффективность каждой меры может существовать в определенных границах доз, определение которых представляет собой важную задачу разработки общих рекомендаций устранения последствий радиационных аварий. Иными словами нижнее граничное значение дозы, характеризует ее экономически обоснованное значение, при превышении которого для рассматриваемого мероприятия выполняется уравнение (1.23).

Из выражений (1.22) и (1.23) также следует, что мера вмешательства является эффективной, если стоимость единицы предотвращенной дозы облучения не превышает значение стоимостного эквивалента  $VE$ , то есть справедливо соотношение:

$$\frac{Q^-(D)}{\Delta D \cdot N} \leq VE \quad (1.24)$$

Для оценки экономической эффективности мероприятий по защите населения от радиации могут быть использованы модификации традиционных для инвестиционного анализа критериев. Их можно использовать в следующих



постановках задач поиска по выбору оптимальной стратегии устранения последствий радиационных аварий [10]:

1) Максимизация выгод от применения рисковнижающего мероприятия, определяемых как разность связанных с вмешательством пользой и издержками (млн. долл. США),

$$Q^+(D) - Q^-(D) \rightarrow \max ; \quad (1.25)$$

2) Минимизация стоимости единицы предотвращенной защитной мерой коллективной дозы облучения населения (долл. США/ чел.-Зв),

$$\frac{Q^-(D)}{\Delta D \cdot N} \rightarrow \min ; \quad (1.26)$$

3) Максимизация удельной эффективности издержек от защитной меры (чел.-Зв/долл. США),

$$\frac{\Delta D \cdot N}{Q^-(D)} \rightarrow \max ; \quad (1.27)$$

4) Минимизация остаточного после применения меры вмешательства радиационного риска для населения (представленный либо в виде вероятности радиационно-обусловленной смертности, либо в виде ожидаемой потери человек-лет жизни населения),

$$REID(D_R) \rightarrow \min . \quad (1.28)$$

Перечисленные критерии являются взаимозаменяемыми, но не эквивалентными, за исключением выражений (1.26) и (1.27) [117,124]. В зависимости от выбора основного критерия органы управления, принимающие решения, получают различные варианты стратегий по устранению последствий радиационных аварий. При этом решения, базирующиеся на критериях (1.25)-(1.27), будут характеризоваться большим уровнем экономических выгод, в то время как решения согласно критерию (1.28) обеспечат максимальную радиационную безопасность населению.

#### 1.4. Модели оценки радиационного риска

Представленные выше показатели риска рассчитываются на базе ретроспективных данных чрезвычайных ситуаций, связанных с утечкой радиации. Эти оценки могут использоваться для прогнозирования онкологической заболеваемости (смертности) в других популяциях, в случае потенциального их облучения. Однако на сегодняшний день нет достаточно обширной базы данных, которая позволила бы получить статистически значимые оценки рисков в «малых» дозах радиационного облучения. В связи с этим для оценки радиационного риска в этом диапазоне доз используются модели его аппроксимации из области «больших» и «средних» доз.

В современной научной литературе в этих целях используются следующие гипотезы и формы аппроксимации радиационного риска:

- гипотеза повышенной опасности облучения в «малых» дозах, надлинейная форма дозовой зависимости (вогнутая функция) [47,48,64,91];
- линейная беспороговая гипотеза, линейная форма зависимости [44,108];
- гипотеза пониженного радиационного воздействия «малых» доз, дозовая зависимость представляется в виде выпуклой функции [128-131];
- гипотеза о положительном воздействии радиации в «сверхмалых» дозах (не более 10-20 мЗв/год) на организм человека, наличие пороговых значений доз, при которых радиационный риск отсутствует [25,26,45].

Эти гипотезы основываются на результатах анализа различных радиационно-эпидемиологических исследований, оперирующих различными факторами, которые, как предполагается, оказывают различное влияние на результаты облучения, уменьшая и увеличивая тяжесть его последствия [6,69,84]. Наибольшее распространение получила линейная беспороговая гипотеза (линейная беспороговая концепция (ЛБК)), рекомендованная МКРЗ для оценки радиационных рисков в области «малых» доз облучения.

Согласно предположениям ЛБК в областях малых доз радиационного воздействия, не превышающих его уровень в 100-200 мЗв/год, вероятность

проявления стохастических эффектов у облученных и их потомства линейно зависит от величины дозы и не имеет порога. Иными словами не существует доз, ниже которых вероятность радиационно-обусловленного рака исключена. При этом, поскольку при малых дозах увеличение частоты рака, по-видимому, поглощается колебаниями в диапазонах его спонтанной «нормы», а молекулярные механизмы канцерогенеза не настолько обоснованы, чтобы их можно было использовать в расчетных оценках коэффициентов риска, уровни этих показателей предложено определить на основе линейной экстраполяции частот проявления раковых заболеваний после облучения при средних и высоких дозах.

Гипотеза предполагает, что уровень пожизненного радиационного риска для всех индивидуумов, подверженных облучению эффективной дозой  $D$ , упрощенно можно оценить на основе следующего выражения:

$$REID = r_D \cdot D, \quad (1.29)$$

где  $r_D$  – коэффициент номинального риска смерти индивида (таблица 1.2) [44,108].

Таблица 1.2

Коэффициенты номинального риска ( $\cdot 10^{-2} \text{Зв}^{-1}$ ) для стохастических эффектов [44]

Популяция	Рак		Наследственные эффекты		Всего	
	Публ. 103	Публ. 60	Публ. 103	Публ. 60	Публ. 103	Публ. 60
<b>Население в целом (от 0 до 85 лет)</b>	5,5	6	0,2	1,3	5,7	7,3
<b>Профессионалы* в возрасте от 18 до 64 лет</b>	4,1	4,8	0,1	0,8	4,2	5,6

\* к профессионалам относятся лица, нанятые работодателем на основе полной, частичной или временной занятости, ознакомленные с профессиональными рисками и признающие свои обязанности в отношении обеспечения радиационной защиты.

Представленные в таблице 1.2 оценки коэффициентов номинального риска оценены на основе накопленной информации об онкологической заболеваемости и смертности в когорте выживших после атомной бомбардировки в Хиросиме и Нагасаки в 1945 году. В Публикации 103 (2007 год) МКРЗ они были значительно снижены для наследственных эффектов по сравнению с публикацией 60 (1990

год), так как прямых доказательств их существования не было найдено, однако, так как экспериментальные наблюдения на клеточном уровне достаточно убедительно показывают наличие такого рода рисков для здоровья будущих поколений, то их все же учитывают в системе радиационной защиты. Снижение коэффициента номинального риска для смертности от раковых заболеваний среди облученных связано, в первую очередь, с изменением процедуры его расчета и накоплением новых объемов информации о когорте. Так в Публикации 103 коэффициент номинального риска рассчитывался через показатели онкологической заболеваемости по классам ЗНО с учетом коэффициентов их летальности, скорректированные на потерю комфортного существования в момент прохождения лечения от них, а в Публикации 60 напрямую через показатели онкологической смертности [44].

В таблице 1.3 представлены оценки уровней пожизненного радиационного риска при разовых эффективных дозах облучения меньших 200 мЗв для всего населения и профессионалов, рассчитанных согласно выражению (1.29). Радиационный риск, например, при разовой эффективной дозе облучения всего населения 100 мЗв равный  $5,7 \cdot 10^{-3}$ , фактически означает рост вероятности онкологической смертности в этой популяции в течение всех последующих после облучения лет жизни на 0,55% и негативных наследственных эффектов у последующих поколений на 0,02%.

Таблица 1.3

Усредненные оценки пожизненного радиационного риска для населения и персонала при разовом облучении согласно модели (1.29) (публ. 103 МКРЗ)

Дозы облучения (мЗв)	Средний уровень риска населения (0-85 лет)	Средний уровень риска у профессионалов (18-64 года)
1	$5,7 \cdot 10^{-5}$ ( $5,5 \cdot 10^{-5}$ )*	$4,2 \cdot 10^{-5}$ ( $4,1 \cdot 10^{-5}$ )
5	$2,85 \cdot 10^{-4}$ ( $2,75 \cdot 10^{-4}$ )	$2,1 \cdot 10^{-4}$ ( $2,05 \cdot 10^{-4}$ )
20	$1,14 \cdot 10^{-3}$ ( $1,1 \cdot 10^{-3}$ )	$8,4 \cdot 10^{-4}$ ( $8,2 \cdot 10^{-4}$ )
50	$2,85 \cdot 10^{-3}$ ( $2,75 \cdot 10^{-3}$ )	$2,1 \cdot 10^{-3}$ ( $2,05 \cdot 10^{-3}$ )
100	$5,7 \cdot 10^{-3}$ ( $5,5 \cdot 10^{-3}$ )	$4,2 \cdot 10^{-3}$ ( $4,1 \cdot 10^{-3}$ )
200	$1,14 \cdot 10^{-2}$ ( $1,1 \cdot 10^{-2}$ )	$8,4 \cdot 10^{-3}$ ( $8,2 \cdot 10^{-3}$ )

\* – в скобках указаны значения радиационного риска без учета наследственных эффектов

Проведем сопоставительный анализ данных из таблицы 1.3 с оценками рисков в различных сферах жизнедеятельности. Статистика происшествий со смертельными исходами на производстве, в быту в промышленно развитых странах свидетельствует, что уровни рисков по сферам жизнедеятельности распределяются в основном в пределах двух порядков – от  $10^{-3}$  до  $10^{-5}$  и данные значения достаточно устойчивы во времени [8,33]. Это позволяет сделать вывод, что они приняты обществом, которое их использует при контроле за безопасностью при осуществлении соответствующей деятельности.

По мнению некоторых специалистов [8] мерой приемлемости риска в наиболее опасных сферах профессиональной деятельности по-видимому, можно считать уровень риска смерти лиц, находящихся в состоянии тяжелой болезни. Его значение в развитых странах составляет примерно  $10^{-2}$  [80]. Для населения в качестве верхнего допустимого уровня риска в повседневной жизнедеятельности обосновываются величины порядка от  $1 \cdot 10^{-4}$  до  $5 \cdot 10^{-4}$ . При превышении этих значений общество готово вкладывать средства в повышение безопасности производства, устранение причин гибели людей (снижение аварийности, расширение сфер использования и повышение надежности средств защиты персонала и населения, профилактика несчастных случаев и т.п.). Риски с уровнем  $10^{-3}$  и ниже на опасных производствах для профессионалов и  $10^{-4}$  и ниже для населения в быту обычно считаются допустимыми [74].

При организации радиационной защиты, в условиях нормальной эксплуатации источников ионизирующего излучения, МКРЗ рекомендует устанавливать размер годовой допустимой дозы облучения из расчета индивидуальных пожизненных рисков здоровью населения и профессионалов равных  $5 \cdot 10^{-5}$  и  $10^{-3}$  соответственно. С учетом данных таблицы 1.3 значения этих рисков для профессионалов достигаются при облучении эффективной дозой приблизительно 20 мЗв/год, для населения – 1 мЗв/год. В публикации 103 МКРЗ эти значения доз рекомендуются в качестве основных годовых пределов облучения в ситуациях планируемого облучения (для профессионалов – 20

мЗв/год с усреднением за определенные пятилетние периоды; для населения – 1 мЗв в год) [44,108].

В ситуациях аварийного облучения допустимые дозы для населения и профессионалов (ликвидаторов последствий) увеличиваются до 20 мЗв/год и 100 мЗв/год соответственно. В некоторых случаях допускается облучения профессионалов в дозах выше 100 мЗв/год, если польза от спасения населения превышает вред для спасателей. В случае если доза облучения населения превышает 20 мЗв/год вплоть до 100 мЗв/год, решения о проведении рискоснижающих мероприятий принимаются местными органами управления на основе анализа сложившихся социально-экономических условий на данной территории. Для экономического обоснования расходов на радиационную защиту принимается, что облучение в коллективной эффективной дозе в 1 чел.-Зв приводит к потенциальному ущербу, равному потере примерно 1 чел.-года жизни населения (предполагается, что в случае проявления радиационно-обусловленного рака, облученный в среднем теряет 15 лет жизни). Если население подвергается облучению в эффективных дозах свыше 100 мЗв/год, то применение защитных мер строго обязательно (более подробно международные рекомендации и российские нормативы по радиационной защите представлены в приложении 1.2) [44,108].

В России и странах ЕС эти рекомендации были приняты. Однако в научных кругах продолжают споры о достаточной их обоснованности. В частности отмечается, что во всем мире накоплено достаточно много случаев облучения людей дозами менее 200 мЗв (выжившие после атомной бомбардировки в Хиросиме и Нагасаки, участники испытаний на атомных полигонах, работников атомной промышленности, ликвидаторов аварии на Чернобыльской АЭС и многие другие случаи облучения), и среди них не было обнаружено негативных эффектов радиации [112,133]. В МКРЗ регулярно подчеркивается предполагаемый характер ЛБК, ее предупредительное назначение, связанное с тем, что использование ЛБК ведет к такому регулированию (нормированию) радиационной защиты, которое гарантирует достаточно высокую степень

безопасности для персонала радиационно-опасных предприятий и населения [44,107,108]. Однако при этом радиационные нормативы, устанавливаемые МКРЗ, зачастую базируется на догмах, приводящих к тому, что оценки риска, полученные на их основе, являются скорее «виртуальными». Их использование при обосновании мер защиты является, с одной стороны, причинами роста радиофобии, усиливающейся в условиях информационной неопределенности, малоуправляемой предубежденности и незнания населением радиационным эффектами, а с другой, – нерационального и неэффективного распределения средств, выделяемых на различные направления обеспечения безопасности жизнедеятельности в обществе. Как отмечено в работе [113] это связано с тем, что предупредительное предположение ведет к количественному расчету, этот расчет создает ложную видимость научной достоверности, кажущаяся достоверность задевает формалистическую интерпретацию, которая и принимает «виртуальные» значения за действительные.

Переоценку МКРЗ эффектов радиационного воздействия на организм человека, специалисты, в основном, связывают с некорректностью его оценки на основе ЛБК. В последнее время критика данной концепции ведется по следующим направлениям. Во-первых, подвергается сомнению отсутствие пороговых значений доз, при облучении которыми индивидуум не подвергается радиационному риску. Предположение ЛБК о том, что одна ионизированная молекула может привести к мутации или раку, не совсем корректно. Оно исключает способность к восстановлению молекулы ДНК в организме человека [86]. Большое количество экспериментов над животными и растениями, а также наблюдения за людьми, подвергшихся радиационному воздействию дозами менее 50 мЗв, напротив, продемонстрировали о наличии стимулирующих эффектов воздействия радиации – увеличению выживаемости и способности к быстрому восстановлению организма [26,37,85,99,105,123].

ЛБК противоречат и факты отсутствия негативных эффектов от естественного радиационного фона (ЕРФ). Его значения в разных частях Земного шара в основном колеблется от 1,5 до 30 мЗв/год, а в некоторых достигает и до 100

[106]. Тем не менее, например, эпидемиологические исследования в разных городах Индии показали отрицательную корреляцию между онкологической смертностью и уровнем ЕРФ [118]. Эти результаты, вероятно, вытекают из принципа толерантности, согласно которому любые организмы способны расти и развиваться только в некотором диапазоне воздействия того или иного фактора (в том числе и ионизирующей радиации). При этом нижним пределом толерантности в случае радиации, по всей видимости, является уровень ЕРФ, и снижение облучения организма ниже природного фона приводит к ухудшению способности его выживаемости. В свою очередь верхний предел толерантности должен стать допустимым пределом облучения населения, однако экспериментально его установить пока не представляется возможным.

Вторым направлением критики ЛБК является некорректность именно линейной экстраполяции зависимости «доза-эффект» из областей «больших» и «средних» доз в область «малых». В работе [138], в частности отмечено, что некоторые зависимости «доза-эффект» только кажутся линейными и что главной причиной этого является не хаотичность внутриклеточных событий, а простое следствие из того факта, что чувствительность к радиогенному риску может широко варьироваться среди индивидуумов в популяции. Исследования закономерностей раковых заболеваний в Швеции, проведенные автором этой работы, также свидетельствуют о статистической некорректности линейной аппроксимации зависимости «доза-эффект». По его оценкам не менее чем 27% ежегодной частоты случаев рака в стране лежат вне 95%-х доверительных интервалов. Эти результаты, по-видимому, могут быть объяснены неопределенностью действия неидентифицируемых факторов на частоту раковых заболеваний. В частности, в ряде работ [88,139] отмечается, что в урбанизированных округах, например в Швеции, частота случаев рака была на 20% выше, чем в других районах этой страны. Аналогичное расхождение было выявлено при сопоставлении этой частоты в Киеве и в сельскохозяйственных районах, загрязненных после аварии на ЧАЭС.



В связи с этим ряд специалистов предлагает заменить в моделях оценки радиационных рисков зависимость «доза-эффект» на квадратическую (или линейно-квадратическую) форму, отмечая, что в области малых доз они дают более низкие оценки риска [131]. На наш взгляд, в этих целях можно также использовать логистическую форму [73].

В-третьих, ЛБК не учитывает ряд закономерностей, установленных в радиационно-эпидемиологических исследованиях. Модель (1.29) усредняет пожизненный радиационный риск для всех жителей Земного шара, который, согласно ей, зависит только от эффективной дозы облучения. Стоит отметить, что сама эффективная доза облучения является расчётной величиной, которая учитывает радиационную чувствительность различных органов в организме человека. Однако во многих исследованиях также выявлены зависимости радиационно-обусловленной смертности у индивидуумов в зависимости от пола, возраста на момент облучения, фоновой онкологической смертности и средней продолжительности жизни [98,126,128-130].

В-четвертых, мера пожизненного радиационного риска, рассчитанная на основе модели (1.29), используемая в нормативах радиационной безопасности, и трактуемая как вероятность смерти во все последующие после облучения годы жизни, является несопоставимой с рисками безопасности в других сферах жизнедеятельности, где вероятности смерти оцениваются по частотным характеристикам соответствующих происшествий за год. В ряде исследований говорится о наличии значительной отсрочки проявления радиационного риска с момента облучения (латентного периода) [11,82,136], которую необходимо учитывать для обеспечения сопоставимости. В работе [70] для этого рекомендуется привести оценки радиационных рисков к рискам смерти в течение года путем дисконтирования временных лагов между моментами облучения, обнаружением заболевания и смерти индивидуума, учитывая при этом структуру злокачественных новообразований.

Таким образом, выявленные недостатки ЛБК позволяют сделать вывод о необходимости ее модификаций для получения реалистичных оценок

радиационных рисков в малых дозах. В связи с этим в научной литературе предлагается множество альтернативных методик их расчета. Простейшие из них предлагают использовать усредненные оценки риска  $EAR_{136/1Гр}$  и  $ERR_{136/1Гр}$ , рассчитанные согласно выражениям (1.4) и (1.5) по результатам радиационно-эпидемиологических исследований, в моделях прогнозирования радиационных эффектов. Эти модели также основываются на предположениях линейной зависимости «доза-эффект» и записываются следующим образом:

$$\lambda_1(D) = \lambda_0 \cdot (1 + ERR_{136/1Гр} \cdot D), \quad (1.30)$$

$$\lambda_1(D) = \lambda_0 + EAR_{136/1Гр} \cdot D, \quad (1.31)$$

где  $\lambda_1(D)$  – прогнозируемое значение вероятности онкологического заболевания (смерти) при дозе техногенного облучения  $D$ ,  $\lambda_0(0)$  – ожидаемая фоновая онкологическая заболеваемость (смертность) или вероятность онкологического заболевания (смерти) среди лиц, не подвергшихся техногенному воздействию радиации [136].

В более детализированных подходах предпосылки ЛБК уточняются на основе учета дополнительных характеристик индивидуума, в частности, его пола  $s$ , места постоянного проживания  $c$ , возраста на момент облучения  $e$  и предполагаемого возраста дожития  $a$ . Эти подходы могут быть отражены обобщенными моделями следующего вида:

$$\lambda_1(e, s, c, D, a) = \lambda_0(e, s, c, a) \cdot (1 + ERR^m(e, s, c, D, a)), \quad (1.32)$$

$$\lambda_1(e, s, c, D, a) = \lambda_0(e, s, c, a) + EAR^m(e, s, c, D, a), \quad (1.33)$$

где  $\lambda_1(e, s, c, D, a)$ ,  $\lambda_0(e, s, c, a)$  – прогнозируемая и фоновая онкологическая заболеваемость (смертность) в регионе  $c$  среди жителей пола  $s$ , в диапазоне лет от  $e$  до  $a$  (предполагаемого возраста дожития) соответственно;  $EAR^m(e, s, c, D, a)$  и  $ERR^m(e, s, c, D, a)$  – смоделированный уровень избыточного абсолютного и относительного рисков онкологического заболевания (смерти от рака).

На практике  $EAR^m(e, s, c, D, a)$  и  $ERR^m(e, s, c, D, a)$  для конкретного региона  $c$  моделируют в виде произведения  $p(D)$  и  $\varepsilon(e, s, a)$ , где  $p(D)$  – множитель, характеризующую форму дозовой зависимости,  $\varepsilon(e, s, a)$  – корректирующий

множитель, учитывающий влияние на заболеваемость (смертность) пола  $s$ , возраста на момент облучения  $e$  и предполагаемого возраста дожития  $a$ . В таблице 1.4 предложены формы зависимостей «доза-эффект»  $p(D)$ , используемые в большинстве современных моделей оценки радиационных рисков.

Таблица 1.4

## Возможные формы дозовой зависимости [129]

Название формы	Форма записи*
Линейная	$p(D) = \beta D$
Квадратическая	$p(D) = \gamma D^2$
Линейно-квадратическая	$p(D) = \beta D + \gamma D^2$
Линейная пороговая	$p(D) = \begin{cases} \beta(D - D_1), & D > D_1 \\ 0, & D \leq D_1 \end{cases}$
Непараметрическая	$p(D) = \delta_j, D_{j-1} \leq D < D_j$

\* $\beta, \gamma, \delta$  – неизвестные параметры модели

Таблица 1.5

Возможные формы записи корректирующего множителя  $\varepsilon(e, s, a)$ 

№ п/п [Публикация]	Форма записи $\varepsilon(e, s, a)$ *
1[126,129]	$(1 + k_1 s) \cdot \exp(k_2 e + k_3 \ln(a))$
2[98,136]	$\exp(k_1 s + k_2 \ln(a - e) + k_3 \ln(a))$
3[98,136]	$\exp(k_1 s + k_2 \ln(e))$
4[98,136]	$\exp(k_1 \ln(a - e) + k_2 \ln(a))$
5[98,136]	$\exp(k_1 \ln(a))$
6[98,136]	$\exp(k_1 s + k_2 \ln(a - e))$
7[126,136]	$\exp(k_1 s + k_2 \ln(a - e) + k_3 \ln(a) + k_4 \ln(e))$

\* $s$  – фиктивная переменная, обозначающая пол индивида,  $e$  – возраст на момент облучения,  $a$  – предполагаемый возраст дожития,  $k_1, k_2, k_3, k_4$  – неизвестные параметры моделей.

В таблице 1.5 приведены все встречающиеся в современной научной литературе формы записи корректирующего множителя  $\varepsilon(e,s,a)$ . В приложении 1.3 представлены все разработанные различными научными сообществами модели для основных локализаций онкологических заболеваний. [130,136].

Для получения еще более точной прогнозной оценки  $\lambda_I$  также рекомендуется моделировать значение фоновой онкологической заболеваемости (смертности)  $\lambda_0$ . Один из вариантов формы такой модели предложен в публикации [136] и имеет следующий вид:

$$\lambda_0(e, s, c, a) = \exp(\pi_1 c + \pi_2 s + \pi_3 \ln(a) + \pi_4 (\ln(a))^2 + \pi_5 e),$$

где  $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5$  – неизвестные параметры модели.

Большинство предложенных в приложении 1.3 моделей базируются на результатах исследования японской когорты выживших после атомных бомбардировок Хиросимы и Нагасаки в 1945. Эта когорта является самой представительной, лучше всего изученной и модели, полученные на ее основе, на сегодняшний день лучше всего описывают особенности радиационного воздействия на организм человека. В связи с этим возникает вопрос о возможности их использования для прогнозирования радиационного риска в других популяциях. В докладе НКДАР ООН отмечают, что, ввиду отсутствия других аналогичных масштабных исследований, в этих целях допускается применение японских моделей [135].

Обозначим значения избыточного относительного и абсолютного рисков, рассчитанных согласно моделям из приложения 1.3, как  $ERR^m(e,s,c=J,D,a)$  и  $EAR^m(e,s,c=J,D,a)$  соответственно. Тогда оценить радиационный риск для жителей региона  $T$  можно на основе следующих выражений:

$$\lambda_1(e, s, c = T, D, a) = \lambda_0(e, s, c = T, a) \cdot (1 + ERR^m(e, s, c = J, D, a)) \quad (1.34)$$

$$\lambda_1(e, s, c = T, D, a) = \lambda_0(e, s, c = T, a) + EAR^m(e, s, c = J, D, a) \quad (1.35)$$

где  $\lambda_I(e,s,c=T,D,a)$  – прогнозируемое значение онкологической заболеваемости (смертности) у жителей региона  $T$ , пола  $s$ , с возрастом на момент облучения  $e$  до возраста  $a$  при эквивалентной или поглощенной дозе облучения  $D$ ,  $\lambda_0(e,s,c=T,a)$  –

фоновое значение онкологической заболеваемости (смертности) у жителей региона  $T$ , пола  $s$ , с возраста  $e$  до  $a$  [135].

На основе прогнозных оценок  $\lambda_I(e,s,c,D,a)$  можно получить возрастные распределения радиационного риска. Величина избыточного абсолютного риска заболевания (смерти) в течение конкретного возраста  $A$  рассчитывается следующим образом:

$$EAR^m(e,s,c,D,A) = ((\lambda_I(e,s,c,D,a=A+1) - \lambda_I(e,s,c,D,a=A)) - (\lambda_0(e,s,c,D,a=A+1) - \lambda_0(e,s,c,D,a=A))), \quad (1.36)$$

где  $EAR^m(e,s,c,D,A)$  – прогнозное значение избыточного абсолютного риска в возрасте  $A$  у индивидуума, проживающего в регионе  $c$ , пола  $s$ , облученного в возрасте  $e$  эквивалентной (поглощенной) дозой  $D$ .

В свою очередь, прогнозные значения пожизненного радиационного риска и ожидаемой потери человек-лет жизни индивидуума можно оценить, используя прогнозные значения возрастных распределений  $EAR^m$  с учетом коэффициентов дожития:

$$REID^m(e,s,c,D) = \sum_{A=e+T_{lat}}^{A_l} EAR^m(e,s,c,D,A) \cdot S(s,c,A|D,e), \quad (1.37)$$

$$LLE^m(e,s,c,D) = \sum_{A=e+T_{lat}}^{A_l} EAR^m(e,s,c,D,A) \cdot (A_l - A) \cdot S(s,c,A|D,e), \quad (1.38)$$

где  $REID^m(e,s,c,D)$  и  $LLE^m(e,s,c,D)$  – соответственно прогнозные значения пожизненного радиационного риска и ожидаемой потери человек-лет жизни индивидуума, проживающего в регионе  $c$ , пола  $s$ , облученного в возрасте  $e$  эквивалентной (поглощенной) дозой  $D$ ;  $T_{lat}$  – латентный период между облучением и возникновением радиационного рака; коэффициент естественного дожития с учетом облучения  $S(s,c,A|D,e)$  рассчитывается следующим образом:

$$S(s,c,A|D,e) = S(s,c,A) - EAR^m(e,s,c,D,A) \quad (1.39)$$

Отметим некоторые особенности применения представленных подходов и моделей воздействия радиации на организм человека. Коэффициенты моделей,

представленных в приложении 1.3, а также модели (1.29) оценены на случай острого (разового) облучения. Однако при хроническом (длительном) облучении индивидуумов выявлено значительное снижение уровней радиационного риска при аналогичных с острым значениях накопленных доз. В МКРЗ для оценки риска при продолжительном облучении рекомендует использовать в расчетах коэффициент  $DDREF$  (*dose and dose-rate effectiveness factor*) [35,44,53,108,118,136]. Если обозначить  $EAR_{acute}(D)$  – рассчитанное прогнозное значение избыточного абсолютного риска популяции при разовом облучении дозой  $D$ , то прогнозное значение избыточного абсолютного риска при хроническом облучении (в течение длительного периода с общей накопленной дозой облучения  $D$ ) рассчитывается следующим образом:

$$EAR_{chronic}(D) = \frac{1}{DDREF} \cdot EAR_{acute}(D). \quad (1.40)$$

МКРЗ рекомендует  $DDREF=2$  [44,108]. В докладе НКДАР 1993 [133] пришли к заключению, что  $DDREF$  должен применяться для расчета риска возникновения онкологического заболевания при низкой интенсивности облучения до 0,1 мГр./мин и ниже, но при условии, что общая доза облучения менее 200 мГр/год.  $DDREF$  не был оценен в отдельности для разных тканей, но исходя из имеющейся информации об онкологической заболеваемости на загрязненных территориях, предлагается использовать этот коэффициент для различных тканей не более 3. На основе последних данных по японской когорте и экспериментов над животными, BEIR VII Committee [118] оценил коэффициент  $DDREF$  для солидных раков равный 1,5 (95% доверительный интервал [1,1;2,3]). Однако значение  $DDREF$  выше 2 встречается во многих клеточных системах; для большинства изученных раков животных, по своей структуре схожих с раками у человека, расчетные значения находятся в диапазоне от 2 до 6, с математическим ожиданием в диапазоне от 4 до 5.

Также многими специалистами отмечается наличие латентного периода между облучением и возникновением онкологических заболеваний и смерти индивидуума ( $T_{lat}$  в формулах (1.37) и (1.38)) [11,14,82,136]. В разных

исследованиях эта величина варьируется для солидных раков от 5 до 10 лет (для некоторых видов солидных раков до 30 лет) и для лейкемии от 2 до 5 лет. В МКРЗ и НКДАР склоняются к среднему значению латентного периода 5 годам ( $T_{lat} = 5$  лет). Это следует учитывать при расчете уровней радиационного риска, принимая значения избыточного абсолютного риска в диапазоне возрастов облученного от  $e$  до  $e+5$  равного 0.

Несмотря на многообразие предложенных моделей оценки радиационных рисков, проблема получения их статистически значимых оценок по-прежнему остается актуальной. Во второй главе на основе анализа статистических данных последствий облучения выживших после атомных бомбардировок Хиросимы и Нагасаки, а также некоторых других крупных радиационных происшествий, автором предлагаются подходы к уточнению этих оценок, строятся новые модели, которые апробируются на примере расчета всех показателей рисков для жителей Российской Федерации.

## Глава 2 Модифицированные подходы к оценке радиационных рисков

### 2.1 Факторы, влияющие на достоверность и статистическую значимость оценок радиационного риска

При проведении когортных исследований облученных вследствие радиационной аварии, еще на этапе сбора исходной информации, специалисты сталкиваются с рядом факторов, значительно ухудшающих достоверность оценки радиационного риска [127]. Основным из них является неопределенность в оценке индивидуальных доз облучения населения. Ее причиной является тот факт, что для большинства жителей поглощенные дозы облучения оцениваются не на основе индивидуальных замеров биодозиметрами, а аппроксимируются для группы людей в среднем в зависимости от загрязненности территории, типа поселения, близости от источника излучения, состава радионуклидов, рациона питания и других параметров. В публикациях [16,22,41,57] приведены примеры методик расчета доз для населения и ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС. Аналогичный пример влияния методики аппроксимации на оценку риска представлен в материалах исследования когорты выживших после атомной бомбардировки в Хиросиме и Нагасаки в 1945 г., которая в мировой литературе получила название *LSS (life spin study)*. До 2000 года при оценке индивидуальных доз в данной когорте использовалась система дозиметрии DS86, которая впоследствии была заменена на DS02. В результате применения новой системы расчета, оценка радиационного риска для населения в среднем снизилась на 7% для солидных раков и на 12% для лейкемии [98].

При оценке индивидуальных доз облучения на основе замеров биодозиметрами, причиной ошибки может стать погрешность прибора или его низкая радиочувствительности. В публикациях [117,140] подробно проанализированы такого рода ошибки и предложены статистические методы их учета. Также в большинстве радиационно-эпидемиологических исследованиях не принимают в расчет уровень естественного радиационного фона, который, в свою



очередь, искажает данные об индивидуальных дозах техногенного облучения [136].

Обозначим  $D_T$  как истинное значение индивидуальной дозы облучения,  $D_C$  – оцененное значение,  $\Delta D$  – погрешность оценки. В этом случае  $D_T$  равно сумме  $D_C$  и  $\Delta D$ . Для представления значимости погрешности оценки в полной мере в публикации [57] приведен пример с оценкой индивидуальных доз для населения после аварии на Чернобыльской АЭС, где значения  $\Delta D$ , в некоторых случаях, достигали более чем  $\pm 100\%$  от значения  $D_C$ . Такая погрешность впоследствии скажется на этапе распределения облученных по дозовым группам. Подобного рода ошибки получили название ошибки Бергсона [114,127]. Также стоит учитывать и медицинские ошибки в установлении диагноза или причины смерти людей.

Согласно выражениям (1.11) и (1.12) на статистическую значимость оценки радиационного риска влияют следующие факторы:

- Объем выборки (количество диагностируемых случаев онкологического заболевания (смерти) в общей когорте);
- Средняя индивидуальная доза облучения;
- Доля облученных в общей когорте;
- Значение самой оценки радиационного риска.

В докладе НКДАР, в частности, определены значения объема выборки, достаточного для получения статистически значимой оценки ERR, в зависимости от средней индивидуальной дозы облучения и значения оценки ERR во всем диапазоне доз. Известно, что объем выборки, необходимый для определения радиационного эффекта с адекватной статистической значимостью (более 80%), обратно пропорционален квадрату дозы облучения или квадрату коэффициента избыточного относительного риска на единицу дозы. На рисунках 2.1 и 2.2 представлены такого рода зависимости. Например, если ERR на единицу дозы равен  $4 \text{ Зв}^{-1}$ , то, для получения статистически значимых результатов, необходимо около 34 смертей от злокачественных новообразований, если ERR на единицу дозы равен  $0,4 \text{ Зв}^{-1}$  – 765, если  $0,04 \text{ Зв}^{-1}$  – 50000 [92]. В LSS, где средний ERR на

единицу дозы для солидных раков равен  $0,467 \text{ Зв}^{-1}$ , а для лейкемии  $3,968 \text{ Зв}^{-1}$  [98], для статистически значимой оценки рисков при средней дозе облучения 10 мЗв необходима выборка из 45700 случаев смерти от солидных раков и около 910 случаев смерти от лейкемии, при средней дозе 100 мЗв – 700 смертей от солидных раков и 43 от лейкемии, при средней дозе 1 Зв – 37 смертей от солидных раков и 9 смертей от лейкемии.

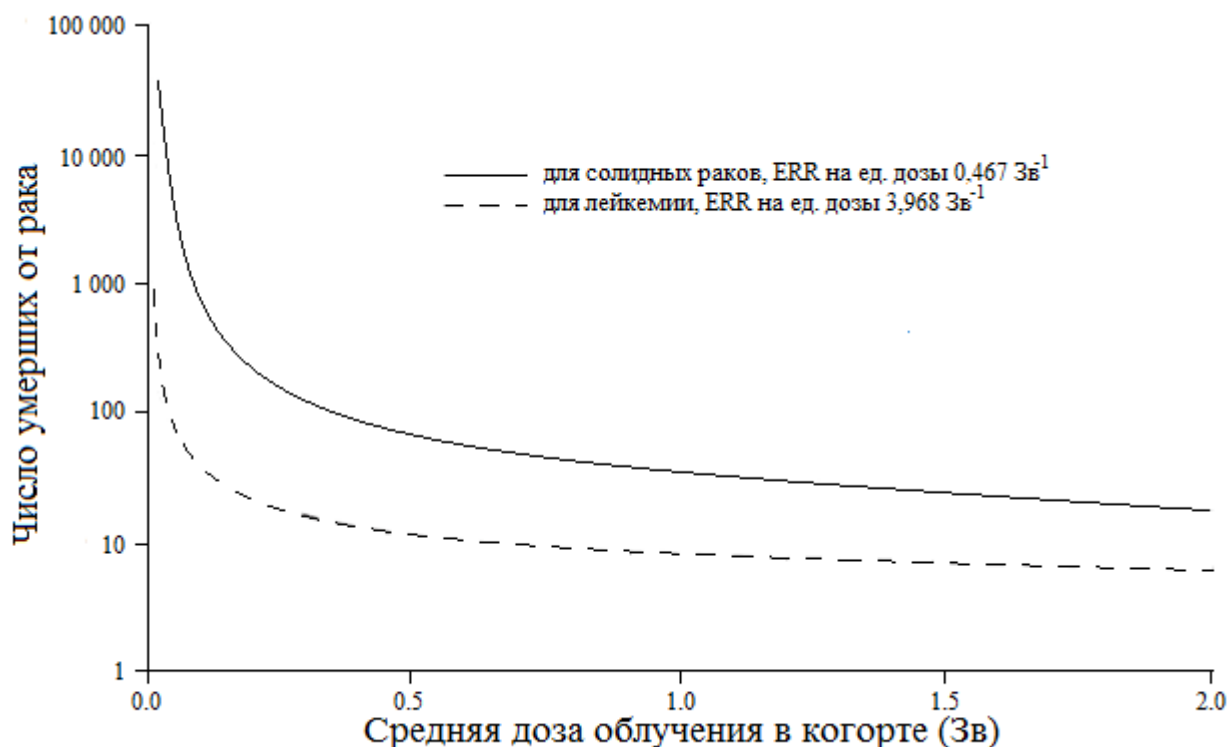


Рис. 2.1 Влияние средней дозы облучения на объем выборки (число умерших от рака), необходимой для получения статистически значимых оценок риска [136]

Точность оценки риска характеризуется длиной ее доверительного интервала. В докладе НКДАР ООН 2006 приведены рассчитанные доверительные интервалы оценки риска при различных сценариях облучения (таблица 2.1). Например, в когорте, где число лиц в облученной и необлученной группах одинаково, среднее значение индивидуальной поглощенной дозы облученных 1 Гр, а общее число зарегистрированных случаев онкологических заболеваний – 800, распределенное между этими группами в отношении 533 и 267 соответственно, то рассчитанное значение избыточного относительного риска на единицу дозы в этой группе равно  $1 \text{ Гр}^{-1}$  с доверительным интервалом оценки

риска (на уровне значимости 95%) –  $(0,73;1,32)$  Гр<sup>-1</sup> (сценарий E). Однако если в приведенном сценарии заменить значение средней индивидуальной поглощенной дозы облученных на 0,05 Гр, а распределение числа случаев онкологических заболеваний между облученными и необлученными группами на 410 и 390 соответственно, то доверительный интервал для практически аналогичной оценки избыточного относительного риска на единицу дозы  $1,03$  Гр<sup>-1</sup> будет равен  $(-1,7;4,16)$  Гр<sup>-1</sup>. Полученный результат наглядно демонстрирует зависимость точности оценки радиационного риска от величины средней индивидуальной дозы облучения. Также на основании таблицы 2.1 можно сделать вывод о существенном влиянии объемов выборки и доли облученных лиц от общей численности когорты на длину доверительного интервала оценки риска.

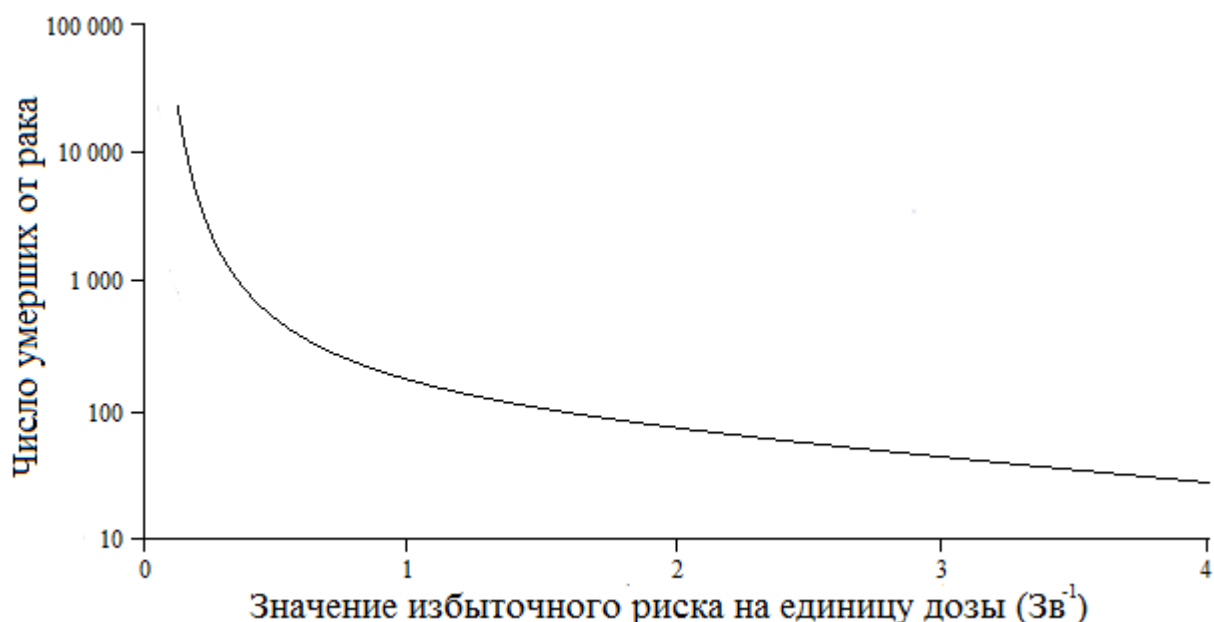


Рис. 2.2 Влияние избыточного относительного риска на единицу дозы на объем выборки (число умерших от рака) при средней дозе облучения 0,21 Зв, необходимой для получения статистически значимых оценок [136]

При оценке радиационного риска в случае хронического облучения, источником значительной неопределенности является выбор коэффициента DDREF. В частности, в работах [30,31] отмечается, что учет статистического разброса (со средним значением DDREF=2) может привести к 6-ти кратному

снижению прогнозируемого значения смертности от солидных раков при оценке радиационного риска для российской популяции.

Таблица 2.1

Влияние среднего значения индивидуальной дозы облучения, общего числа зарегистрированных случаев онкологических заболеваний и доли облученных лиц в исследуемой когорте на длину доверительного интервала оценки риска [136]

Сценарий	Доза (Гр)	Выборка*	Доля облученных в когорте (%)	Ожидаемое количество смертей от раков в каждой группе		Оценка ERR <sub>Гр</sub> (Гр <sup>-1</sup> ) и доверительный интервал
				Среди облученных	Среди необлученных	
A	1	50	50	33	17	0,94 (0,1;2,56)
B	1	100	50	67	33	1,03 (0,35;2,12)
C	1	200	50	133	67	0,99 (0,49;1,68)
D	1	400	50	267	133	1,01 (0,63;1,48)
E	1	800	50	533	267	1 (0,73;1,32)
F	0,05	50	50	26	24	1,67 (-7,58;17,95)
G	0,05	100	50	51	49	0,82 (-5,95;10,86)
H	0,05	200	50	102	98	0,82 (-4,23;7,49)
I	0,05	400	50	205	195	1,03 (-2,72;5,59)
J	0,05	800	50	410	390	1,03 (-1,7;4,16)
K	1	50	10	9	41	0,98 (-0,1;2,88)
L	1	100	10	18	82	0,98 (0,15;2,21)
M	1	200	10	36	164	0,98 (0,36;1,8)
N	1	400	10	73	327	1,01 (0,56;1,57)
O	1	800	10	145	655	0,99 (0,66;1,38)
P	0,05	50	10	5	45	0 (-13,07;25,77)
Q	0,05	100	10	10	90	0 (-10,24;16,55)
R	0,05	200	10	21	179	1,12 (-6,95;12,38)
S	0,05	400	10	42	358	1,12 (-4,88;8,71)
T	0,05	800	10	84	716	1,12 (-3,27;6,3)

\*Количество случаев смертей от рака в когорте

Как уже упоминалось ранее, несмотря на достаточно большие объемы накопленной информации о случаях техногенного облучения людей, проблема получения статистически значимых оценок рисков в диапазоне малых дозах, не превышающих 200 мЗв, на практике остается открытой. Продемонстрируем это на примере анализа последствий радиационного облучения когорты выживших после атомной бомбардировки в Японии. Исходные данные о смертности от онкологических заболеваний (по группе солидных раков и лейкемии)

представлены в таблицах 2.2 и 2.3 (более подробная информация по когорте представлена в таблицах П.2.1-П.2.3 (приложение 2.1)).

Таблица 2.2

Фактическое число умерших от солидных раков в когорте выживших после атомной бомбардировки за период с 1950 по 2003 годы, сгруппированных по индивидуальной дозе облучения и возрасту на момент облучения,  $O(e_i, D_j)$

Дозовая группа (мГр) \ Возраст на момент облучения	Возраст на момент облучения					
	0-9 ( $e_1$ )	10-19 ( $e_2$ )	20-29 ( $e_3$ )	30-39 ( $e_4$ )	40-49 ( $e_5$ )	50+ ( $e_6$ )
0-5 ( $D_0$ )	279	723	671	1063	1079	806
5-100 ( $D_1$ )	250	584	472	854	873	620
100-200 ( $D_2$ )	49	107	115	176	203	139
200-500 ( $D_3$ )	53	133	150	192	205	137
500-1000 ( $D_4$ )	31	96	92	100	124	76
1000-2000 ( $D_5$ )	38	82	67	73	58	35
2000+ ( $D_6$ )	19	35	21	20	22	7

Таблица 2.3

Фактическое число умерших от лейкемии в когорте выживших после атомной бомбардировки за период с 1950 по 2003 годы, сгруппированных по индивидуальной дозе облучения и возрасту на момент облучения,  $O(e_i, D_j)$

Дозовая группа (мГр) \ Возраст на момент облучения	Возраст на момент облучения					
	0-9 ( $e_1$ )	10-19 ( $e_2$ )	20-29 ( $e_3$ )	30-39 ( $e_4$ )	40-49 ( $e_5$ )	50+ ( $e_6$ )
0-5 ( $D_0$ )	12	19	11	25	25	7
5-100 ( $D_1$ )	9	13	19	14	15	8
100-200 ( $D_2$ )	2	9	4	1	2	0
200-500 ( $D_3$ )	3	5	3	5	4	7
500-1000 ( $D_4$ )	9	6	5	4	3	3
1000-2000 ( $D_5$ )	11	8	5	6	6	3
2000+ ( $D_6$ )	6	5	5	6	3	2

Обоснованность оценок радиационного риска базируется на результатах сопоставления данных о смертности от онкологических заболеваний среди лиц,

получивших индивидуальную дозу облучения более 5 мГр, с аналогичными показателями смертности по группе сравнения – индивидуумов, получивших индивидуальную поглощенную дозу менее 5 мГр (среднее значение дозы в данной группе около 1 мГр, что не превышает фоновые значения). Если предположить, что радиация не оказывает негативного воздействия на организм человека, то ожидаемое число умерших от солидных раков и лейкемии за период с 1950 по 2003 годы в каждой дозовой и возрастной группах должны соответствовать данным представленным в таблицах 2.4 и 2.5, которые характеризуют фоновый уровень онкологической смертности.

Таблица 2.4

Ожидаемое число умерших от солидных раков в когорте выживших после атомной бомбардировки за период с 1950 по 2003 годы в соответствующей дозовой и возрастной группе,  $E(e_i, D_j)$

Возраст на момент облучения \ Дозовая группа (мГр)	0-9 ( $e_1$ )	10-19 ( $e_2$ )	20-29 ( $e_3$ )	30-39 ( $e_4$ )	40-49 ( $e_5$ )	50+ ( $e_6$ )
5-100 ( $D_1$ )	242	543	493	860	852	621
100-200 ( $D_2$ )	45	95	103	179	188	129
200-500 ( $D_3$ )	44	110	120	202	196	131
500-1000 ( $D_4$ )	19	80	72	93	105	63
1000-2000 ( $D_5$ )	12	43	37	55	51	25
2000+ ( $D_6$ )	4	18	12	16	14	9

Значения избыточных относительных рисков на единицу дозы для смертности от солидных раков и от лейкемии в диапазоне доз превышающих 5 мГр ( $ERR_{Гр}(D > 5 мГр)$ ), равные  $0,47 \text{ Гр}^{-1}$  и  $4,3 \text{ Гр}^{-1}$  соответственно (оцененные согласно выражению 1.10), устойчивы и статистически значимы (критериальные значения, рассчитанные по формулам (1.11) и (1.12), равны 4,83 и 5,9 соответственно). Фактически эти результаты означают, что при получении индивидом поглощенной дозы 1 Гр, вероятность его смерти от солидных раков увеличивается по сравнению с фоновым уровнем на 47%, а от лейкемии на 430%.

Ожидаемое число умерших от лейкемии в когорте выживших после атомной бомбардировки за период с 1950 по 2003 годы в соответствующей дозовой и возрастной группе  $E(e_i, D_j)$

Дозовая группа (мГр) \ Возраст на момент облучения	0-9	10-19	20-29	30-39	40-49	50+
	( $e_1$ )	( $e_2$ )	( $e_3$ )	( $e_4$ )	( $e_5$ )	( $e_6$ )
5-100 ( $D_1$ )	10	13	13	18	17	7
100-200 ( $D_2$ )	2	3	2	4	4	1
200-500 ( $D_3$ )	2	3	2	5	4	2
500-1000 ( $D_4$ )	1	2	2	2	2	1
1000-2000 ( $D_5$ )	1	1	1	1	1	0
2000+ ( $D_6$ )	0	1	0	0	0	0

Значения избыточного относительного риска на единицу дозы для смертности от солидных раков и лейкемии в диапазоне от 5 до 200 мГр  $ERR_{IGp}(5mGp < D \leq 200mGp)$  оказались равными  $0,43 \text{ Гр}^{-1}$  и  $0,66 \text{ Гр}^{-1}$  соответственно. Эти значения не являются статистически значимыми (критериальные значения  $T_{крит}$ , рассчитанные по формулам (1.11) и (1.12), – 0,99 и 0,24 соответственно). Для оценки достаточного набора выборки, обеспечивающую статистическую значимость коэффициента риска смертности от солидных раков  $ERR_{IGp}(5mGp < D \leq 200mGp) = 0,43 \text{ Гр}^{-1}$  в области малых доз, было решено уравнение (1.12), с подставленными значениями  $M(O)$  и  $q$  из выражения (1.11), относительно  $N$  при заданном значении  $T_{крит} = 1,645$ . Результаты решения свидетельствуют, что для обеспечения статистической значимости оценки радиационного риска, общее число зарегистрированных случаев смерти от солидных раков в диапазоне менее 200 мГр должно превышать 25000. Для сравнения в японской когорте это число составляет только 9063 случая.

На основании изложенного можно сделать вывод, что основной причиной статистической незначимости оценки риска в диапазоне малых доз является недостаточный объем выборки в исходных данных. Это, в свою очередь, является

причиной разногласий среди специалистов в части оценки реального воздействия ионизирующего излучения на организм человека и, как следствие, в определении допустимых норм облучения индивидов, которые одновременно удовлетворяли бы требованиям обеспечения безопасности населения и экономической целесообразности затрат на его поддержание.

## **2.2 Методы аппроксимации радиационных рисков при малых дозах облучения**

Ввиду отсутствия возможности напрямую посчитать значения радиационных рисков в малых дозах облучения, на практике для обоснования этих оценок предлагается проводить аппроксимацию статистически значимых рисков из областей «средних» и «больших» доз в область «малых». Форма зависимости между дозой облучения и радиационным риском, которую предполагается использовать в этой аппроксимации, получила название «доза-эффект». Проблеме определения этой формы уделяется наибольшее внимание в современной научной литературе, посвященной оценке влияния ионизирующего излучения на организм человека. В действительности она является основополагающей в моделях оценки радиационных рисков, так как в зависимости от ее выбора существенно меняются прогнозные значения уровней этих рисков. В частности, в публикации [73] наглядно продемонстрировано снижение радиационного риска в области малых доз облучения по сравнению с оценками, полученными на основе ЛБК, приблизительно на 40% в случае использования логистической формы вместо линейной.

Рассмотрим основные варианты формы зависимости «доза-эффект» при облучении в малых дозах, полученные специалистами при изучении последствий крупных радиационных происшествий. Когорта выживших после атомной бомбардировки в Японии в 1945 году является самой масштабной и насчитывает около 120321 человек [137]. Среднее значение индивидуальной дозы облучения для лиц, получивших от 5 до 4000 мЗв (48102 человек), равно 210 мЗв. Отметим, что в ходе атомных бомбардировок люди подвергались воздействию главным



образом гамма-излучения с высокой дозовой мощностью при небольшом воздействии нейтронов, поэтому 1 Гр поглощенной дозы в данном исследовании идентичен 1 Зв эквивалентной дозы [130].

Оценкой радиационного воздействия на здоровье выживших после атомной бомбардировки в Хиросиме и Нагасаки занимается объединенная японо-американская организация «Radiation effects research foundation» (RERF) [122]. В ее последних публикациях [98,126,129,130] представлены оценки избыточного абсолютного и относительного рисков на единицу дозы для смертности и заболеваемости солидными раками, лейкемией и всеми видами злокачественных новообразований отдельно. Полученные результаты показаны в таблице 2.6. Статистических значимых рисков смерти от неонкологических заболеваний в когорте выживших не обнаружено.

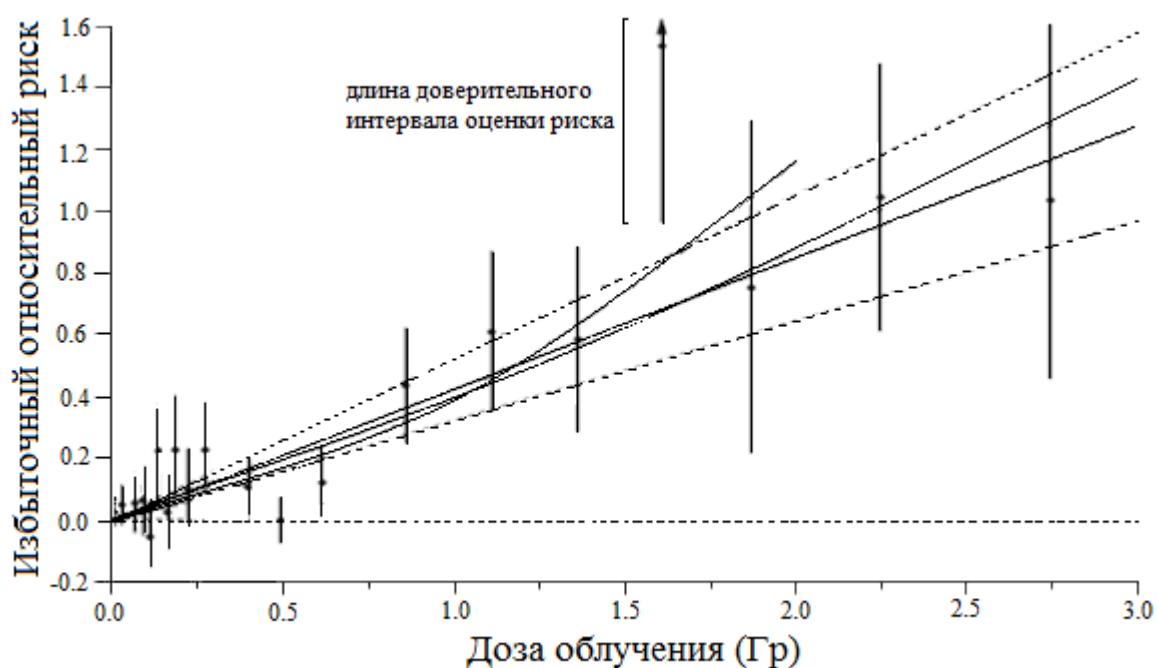


Рис.2.3 Оценки избыточного относительного риска смерти от солидных раков в различных диапазонах доз облучения в когорте выживших после атомной бомбардировки в Японии [130]

На основе результатов оценок рисков по Японской когорте в различных дозовых диапазонах, специалисты пришли к выводу, что для описания

зависимости «доза-эффект» для смертности от солидных раков подходят линейная или линейно-квадратическая (выпуклая) формы, а для смертности от лейкемии – только линейно-квадратическая (выпуклая) форма (рисунок 2.3 и 2.4).

Таблица 2.6

Показатели риска, полученные в исследованиях когорты выживших после атомной бомбардировки в Японии

Локализация	Показатель риска	Мужчины	Женщины	Средний между полами
Смертность (солидные раки) [129,130]	$ERR_{1Гр}$	0,31	0,66	0,47
	$EAR_{13в}$ (на 10000 чел.-3в)	29	30	30
Смертность (лейкемия) [130]	$ERR_{1Гр}$	4,6	3,9	4,3
Заболеваемость (солидные раки) [126]	$ERR_{1Гр}$	0,34	0,61	0,48
	$EAR_{1Гр}$ (на 10000 чел.-Гр)	43	60	52

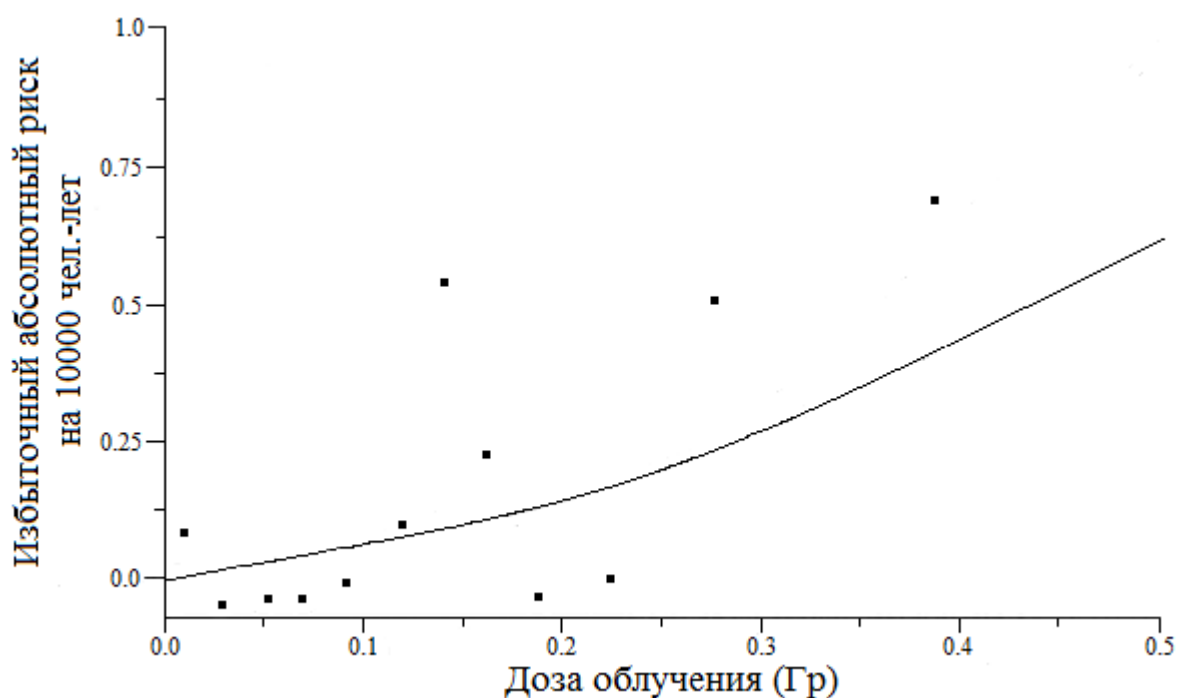


Рис.2.4 Оценки избыточного абсолютного риска на 10000 чел.-Гр смерти от лейкемии в различных диапазонах доз облучения в когорте выживших после атомной бомбардировки в Японии [130]

Еще одним источником информации для оценки радиационных рисков служат результаты исследования жителей населенных пунктов Абайского, Абралинского, Бескарагайского и Жана-Семейского районов Семипалатинской области, подвергшихся воздействию ионизирующего излучения вследствие проведения ядерных испытаний в Казахстане с 1949 года. Когорта насчитывает 19454 человек (9850 облученных и 9604 человек – группа сравнения). За период с 1960 по 1999 гг. (всего 582747 человек-лет исследования) всего умерло 7510 человек (945 от онкологических заболеваний). Накопленная доза облучения среди облученных лиц варьируется от 200 до 1750 мЗв [8,9].

Изучением влияния ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне на здоровье жителей окрестных поселений занимаются в НИИ радиационной медицины и экологии города Семипалатинск. В когортном исследовании зафиксирован значительный рост смертности, вызванной онкологическими и сердечнососудистыми заболеваниями, у облученных индивидов. В частности, относительный риск смерти от рака и от сердечнососудистых заболеваний у мужчин равен 2,2 и 2,7, а у женщин 2,8 и 1,8 соответственно. Причем, наименьшие значения показателей риска зафиксированы в дозовой группе 750 мЗв и более, что говорит о повышенном эффекте воздействия ионизирующего излучения в области малых доз и надлинейной форме зависимости «доза-эффект», полученной в данном исследовании.

Аналогичная форма дозовой зависимости зафиксирована и в когорте рабочих на ПО «Маяк» в Челябинской области [91]. За период с 1948 по 2003 годы было исследовано 17740 рабочих (13228 мужчин и 4512 женщин), из которых всего умерло около 8757 человек (около 25% от онкологических заболеваний). Численность рабочих с нулевой поглощенной дозой составляет 1761 человек, средняя поглощенная доза остальных – 0.81 Гр.

На рисунке 2.5 представлена зависимость избыточного относительного риска от поглощенной внешней дозы облучения и сопоставлены линейная и линейно-квадратическая (вогнутая) формы зависимости. Однако в среднем значения избыточного относительного риска на единицу дозы, представленные в

данном когортном исследовании для солидных раков и лейкемии, не превышают результатов, полученных в японской когорте, и равны 0,3 и 0,45 Гр<sup>-1</sup> соответственно [91]. Увеличение смертности от неонкологических заболеваний в изучаемой когорте не обнаружено.

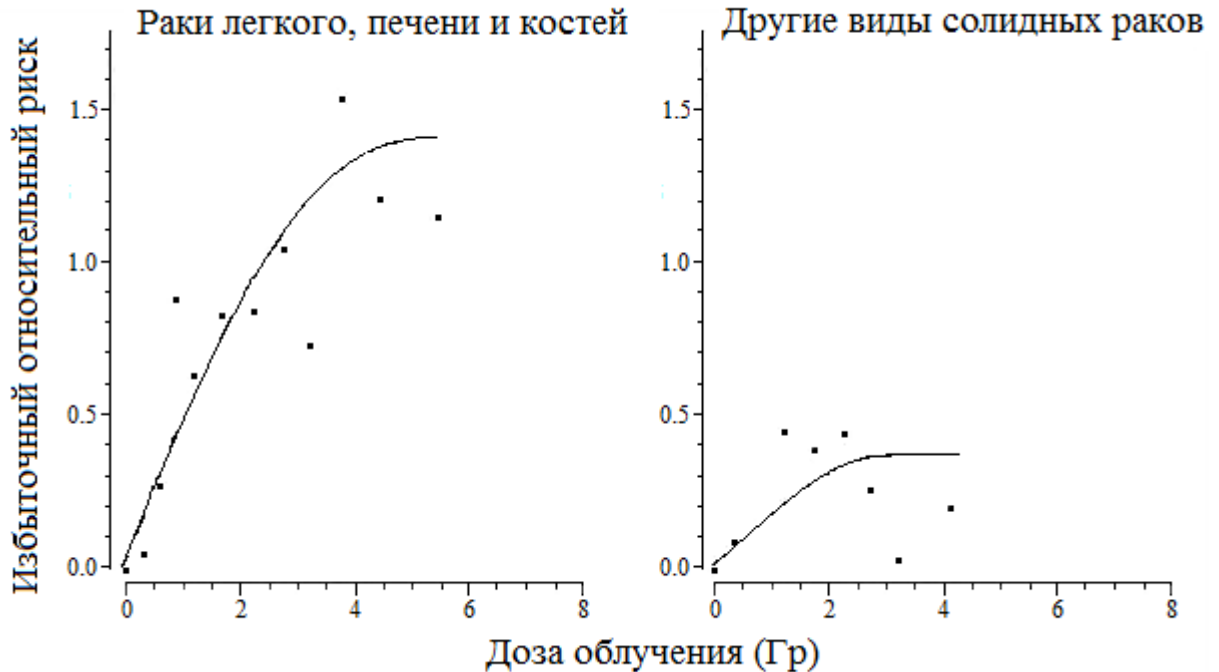


Рис. 2.5 Оценки избыточного относительного риска смерти от солидных раков в различных диапазонах доз облучения среди рабочих на ПО «Маяк» [91]

Последним масштабным исследованием, посвященным оценке воздействия ионизирующего излучения на организм человека, является изучение группы ликвидаторов, участвующих при устранении последствий аварии на Чернобыльской АЭС. Всего группа насчитывает 47125 человек и состоит преимущественно из мужчин в возрасте от 18 до 65 лет (средний возраст около 40 лет). Ликвидаторы подвергались воздействию доз до 1240 мГр, подавляющее большинство (около 95%) было облучено дозами не более 250 мГр, среднее значение дозы в когорте приблизительно 130 мГр [19-21]. Всего к 2010 году в данной группе умерло 13876 человек, из них от солидных раков 2131.

Радиационно-эпидемиологическим исследованием оценки радиационных рисков среди участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС

занимаются в Медицинском радиологическом научном центре (МРНЦ) Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации в городе Обнинск. Избыточный относительный риск на единицу дозы, представленный в последнем отчете МРНЦ по накопленным данным до 2010 года, в изучаемой когорте равен  $0,56 \text{ Гр}^{-1}$  для смертности от солидных раков,  $-0,68 \text{ Гр}^{-1}$  для смертности от лейкемии и  $0,62 \text{ Гр}^{-1}$  для смертности от болезней системы кровообращения [32]. Отметим, что результаты оценки рисков для ликвидаторов Чернобыльской АЭС являются промежуточными, и в дальнейшем будут неоднократно уточняться. Наиболее вероятной формой дозовой зависимости смертности от солидных раков в исследуемой когорте предполагается линейная (рисунок 2.6) [19].

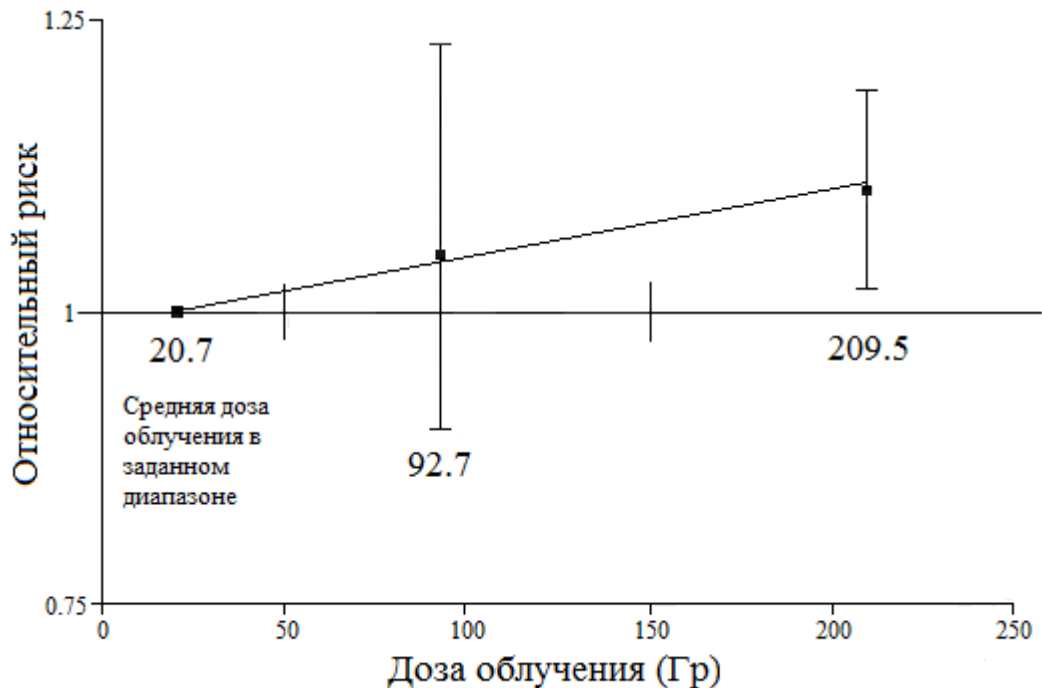


Рис. 2.6 Оценки относительного риска смерти от солидных раков в различных диапазонах доз облучения среди ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС [19].

Таким образом, вывод, о том, что радиационный риск у облученных индивидуумов проявляется в виде увеличения вероятности их онкологической заболеваемости и смертности в будущем, подтверждается во всех исследованиях. Средневзвешенное по коллективным дозам значение избыточного относительного

риска на единицу дозы для онкологических заболеваний по всем когортам равно  $0,42 \text{ Гр}^{-1}$ . В исследованиях на основании визуального анализа значений риска в различных диапазонах доз, представленных на графиках, предлагаются варианты форм дозовых зависимостей. Более точно определить форму этой зависимости, на наш взгляд, можно на основании метода проверки статистических гипотез.

Сопоставив значения коэффициентов риска  $ERR_{IGp}$ , полученных для малых доз облучения ( $5\text{мГр} \leq D \leq 200\text{мГр}$ ) и для всех интервалов доз ( $D \geq 5\text{мГр}$ ) в разделе 2.1 для самой представительной когорты облученных, можно проверить гипотезу о линейном характере зависимости «доза-эффект». В случае статистического равенства этих коэффициентов, гипотеза о линейной зависимости подтверждается. Проверку следует осуществлять с помощью t-критерия Стьюдента, расчетное значение которого оценивается следующим образом:

$$t_{\text{крит}} = \frac{|ERR_{IGp}(D > 5\text{мГр}) - ERR_{IGp}(5\text{мГр} < D \leq 200\text{мГр})|}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} - \frac{s_2^2}{n_2}}}, \quad (2.1)$$

где  $s_1$  –среднеквадратическое отклонение оценки  $ERR_{IGp}(D > 5\text{мГр})$ ,  $s_2$  – среднеквадратическое отклонение оценки  $ERR_{IGp}(5\text{мГр} < D \leq 200\text{мГр})$ ,  $n_1$  – количество наблюдений, которое использовалось для расчета  $ERR_{IGp}(D > 5\text{мГр})$ ,  $n_2$  – количество наблюдений, которое использовалось для расчета  $ERR_{IGp}(5\text{мГр} < D \leq 200\text{мГр})$ .

Если  $t_{\text{крит}}$  не превышает табличное значение Стьюдента  $t_\alpha(n)$  с доверительной вероятностью  $\alpha$  и степенями свободы  $n$ , то гипотезу равенства коэффициентов риска, полученных для «малых» доз облучения ( $5\text{мГр} \leq D \leq 200\text{мГр}$ ) и для всех интервалов доз ( $D \geq 5\text{мГр}$ ), можно считать доказанной. При этом число степеней свободы  $n$  рассчитывается следующим образом [121]:

$$n = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\left(\frac{s_1^2}{n_1}\right)^2 \cdot \frac{1}{n_1 - 1} + \left(\frac{s_2^2}{n_2}\right)^2 \cdot \frac{1}{n_2 - 1}} \quad (2.2)$$

Оценка критерия Стьюдента, согласно выражению (2.1), для смертности от солидных раков оказалась равной 0,54 (при табличном значении  $t_{0,95}(n)=2,18$ ). На этом основании можно считать, что значения коэффициента риска смерти от солидных раков  $ERR_{1Гр}$ , рассчитанные только в области малых доз и для всех диапазонов доз статистически равны между собой. Таким образом, коэффициент риска  $0,47 \text{ Гр}^{-1}$  может быть использован при оценке уровня радиационного риска во всех диапазонах доз («малых», «средних» и «больших»).

Для лейкемии этот результат, очевидно, не подтверждается, так как уже из полученных оценок рисков для «малых» и всего диапазона доз непосредственно следует, что значение избыточного относительного риска на единицу дозы в области «малых» доз значительно ниже аналогичного показателя в области «больших». Этот результат свидетельствует, что зависимость доза эффект для лейкемии, по видимости является нелинейной во всем диапазоне доз облучения. В области «малых» доз облучения на практике рекомендуется линейно-квадратическая (выпуклая) аппроксимация этой зависимости.

Таким образом, полученный результат ставит под сомнение выводы о надлинейном характере зависимости функции «доза-эффект» в области «малых» доз, сделанные на основе анализа менее представительных когорт в Казахстане и на ПО «Маяк». На основании изложенного, можно считать доказанным, что коэффициент риска в случае солидных раков в области малых доз не превышает его значения в области больших, и вероятнее всего равен ему. Данное заключение подтверждает обоснованную МКРЗ линейную беспороговую концепцию и позволяет рассматривать модели с линейной зависимостью «доза-эффект» как наиболее корректные для оценки уровня радиационного риска в случае смертности от солидных раков.

Также стоит отметить, что определить наличие порога воздействия ионизирующего излучения на организм человека или радиационного гормезиса при сверхмалых дозах облучения, опираясь на статистические исследования в японской когорте, не представляется возможным, ввиду недостаточного объема информации. Тем не менее, многие специалисты отмечают, что все

существующие организмы эволюционировали при определённом воздействии радиации и при полной изоляции от нее происходит замедление самых фундаментальных жизненных процессов, в том числе, деление клеток [77]. В связи с этим, наиболее вероятным, на наш взгляд, все же является предположение о наличии порогового значения доз, однако, ввиду отсутствия возможности расчета конкретного его значения, в дальнейшем это предположение не учитывает.

### 2.3 Совершенствование подходов к оценке радиационного риска

Модели оценки радиационного риска, предложенные в приложении 2.3, позволяют представлять совокупный радиационно-обусловленный рост онкологической смертности или в виде суммы роста смертности от солидных раков и лейкемии, или в виде суммы роста смертности по отдельным классам злокачественных новообразований (ЗНО). Тем не менее, модели оценки рисков роста смертности по отдельным классам ЗНО, на наш взгляд, не представляют ценности при оценке радиационного риска, так как параметры этих моделей, рассчитанные, в том числе и для диапазона больших доз, являются статистически незначимыми. Так, например, значение избыточного относительного риска на единицу поглощенной дозы, рассчитанное для смертности от рака пищевода во всех диапазонах доз, равное  $0,6 \text{ Гр}^{-1}$ , было получено на основе 339 случаев смертей от этого класса ЗНО [130]. Эта оценка, согласно выражениям (1.11) и (1.12), статистически незначима ( $T_{крит} = 0,8$ ). В связи с этим, а также, основываясь на выводах, сделанных в предыдущем разделе о зависимостях «доза-эффект», наиболее подходящими из всех современных моделей оценок радиационных рисков являются модели, предложенные в докладе НКДАР 2006:

$$ERR_{solid}(e, s, D, a) = 601 \cdot D \cdot \exp(0,6 \cdot s + \ln(a - e) - 2,61 \ln(a)), \quad (2.3)$$

$$ERR_{leukemia}(D, a) = (865 \cdot D + 1021 \cdot D^2) \cdot \exp(-1,65 \ln(a)), \quad (2.4)$$

где  $s=1$  для женщин и  $s=0$  для мужчин;



$D$  – эквивалентная доза облучения всего организма в модели оценки солидных раков и кровеносной системы в модели оценки лейкемии ( $Зв$ ) [136].

Эти модели были протестированы на основе информации о последствиях облучения жителей Китая, Японии, США, Великобритании и Пуэрто-Рико. Полученные значения линейных коэффициентов риска для разных половозрастных групп варьируются в диапазоне от  $0,3 \cdot 10^{-2}$  до  $12,7 \cdot 10^{-2} Зв^{-1}$ , со средним значением приблизительно равным  $5,5 \cdot 10^{-2} Зв^{-1}$  [136]. Эти результаты свидетельствуют о том, что подобного рода зависимости достаточно хорошо учитывают влияние рассматриваемых факторов на уровень риска у облученных. Заметим, что полученное для них значение среднего риска для населения в целом не отличается от коэффициента номинального риска в агрегированной модели (1.21).

Однако, несмотря на достаточно высокую степень адекватности этих моделей закономерностям проявления последствий облучения, представляется, что методы оценки радиационных рисков можно усовершенствовать, в первую очередь, на основе учета основных параметров проявления онкологических заболеваний в их базовых группах. К этим параметрам относятся: уровень избыточного относительного риска смерти от ракового заболевания, среднее время его проявления с момента облучения и коэффициент летальности.

Кластеризация основных классов раковых заболеваний обусловлена необходимостью построения статистически значимых моделей для оценки радиационного риска. В свою очередь, для моделирования роста онкологической смертности по каждому заболеванию отдельно, имеющих исходных данных недостаточно. В таблице 2.7 представлены рассчитанные значения коэффициентов риска  $ERR_{Зв}$  для основных классов ЗНО в японской когорте, их изменения во времени и коэффициенты летальности соответствующих раковых заболеваний.

С использованием метода кластерного анализа (Ward's Method) [71] все виды раковых заболеваний достаточно устойчиво классифицируются в рамках 3 кластеров (рисунок 2.7). В первый кластер вошли смертельные виды раковых

заболеваний: пищевода, желудка, печени, желчного пузыря, поджелудочной железы и легкого; во второй кластер – онкологические заболевания, которые при современном уровне развития медицины, относят к излечиваемым: раки толстой и прямой кишки, груди, мочеполовой системы и все другие виды злокачественных новообразований, кроме лейкемии. В третий кластер вошла лейкемия, как онкологическое заболевание с сильно выделяющимся на фоне остальных линейными коэффициентами риска.

Таблица 2.7

Коэффициенты риска, рассчитанные для всех видов ЗНО, в зависимости от периода, прошедшего с момента облучения и коэффициенты летальности болезней.

№ п/п	Локализация ЗНО	Коэффициент риска $ERR_{Гр}$ ( $Гр^{-1}$ ) за период:			Коэффициент летальности [44]
		20 лет с момента облучения	40 лет с момента облучения	58 лет с момента облучения	
1	Пищевод	0,74	0,24	0,57	0,93
2	Желудок	0,56	0,36	0,28	0,83
3	Толстая кишка	1,05	0,97	0,56	0,48
4	Прямая кишка	-0,25	-0,14	0,12	0,48
5	Печень	-0,51	0,02	0,26	0,95
6	Желчный пузырь	0,35	0,25	0,33	0,95
7	Поджелудочная железа	-0,22	0,35	0,09	0,96
8	Легкое	0,46	0,74	0,47	0,89
9	Грудь (только женщины)	0,33	1,18	1,3	0,29
10	Мочеполовая система у женщин	1,16	0,88	0,48	0,4
11	Мочеполовая система у мужчин	1,25	0,32	0,48	0,4
12	Другие солидные раки	1,02	1,02	0,7	0,5
13	Лейкемия	8,7	5,1	4,4	0,65
14	Другие гемобласты	0,72	0,45	0,32	0,5

Значения избыточных относительных рисков на единицу дозы смертности от классов раковых заболеваний первого, второго и третьего кластеров для доз превышающих 5 мГр  $ERR_{Гр}(D>5мГр)$  равны 0,31  $Гр^{-1}$ , 0,56  $Гр^{-1}$  и 4,3  $Гр^{-1}$

соответственно. В результате уровень радиационного риска для смертельных видов раковых заболеваний существенно ниже по сравнению с несмертельными видами. Таким образом, популяции, характеризующиеся большей долей смертности от раковых заболеваний 2 кластера в общей структуре онкологической смертности, будут иметь больше оценки радиационных рисков по сравнению с другими популяциями.

Оценки радиационных рисков, полученные для всех кластеров, устойчивы и статистически значимы (критериальные значения, рассчитанные согласно выражениям (1.11) и (1.12), равны 2,8, 3,5 и 5,9 соответственно). Кластеризация на три группы является оптимальной с точки зрения получения статистически значимых оценок радиационного риска внутри каждого кластера. Если разделить предложенную совокупность на четыре группы, то оценки радиационных рисков, полученные для образовавшегося 4-го кластера (смертности от раков груди), будут статистически незначимыми.

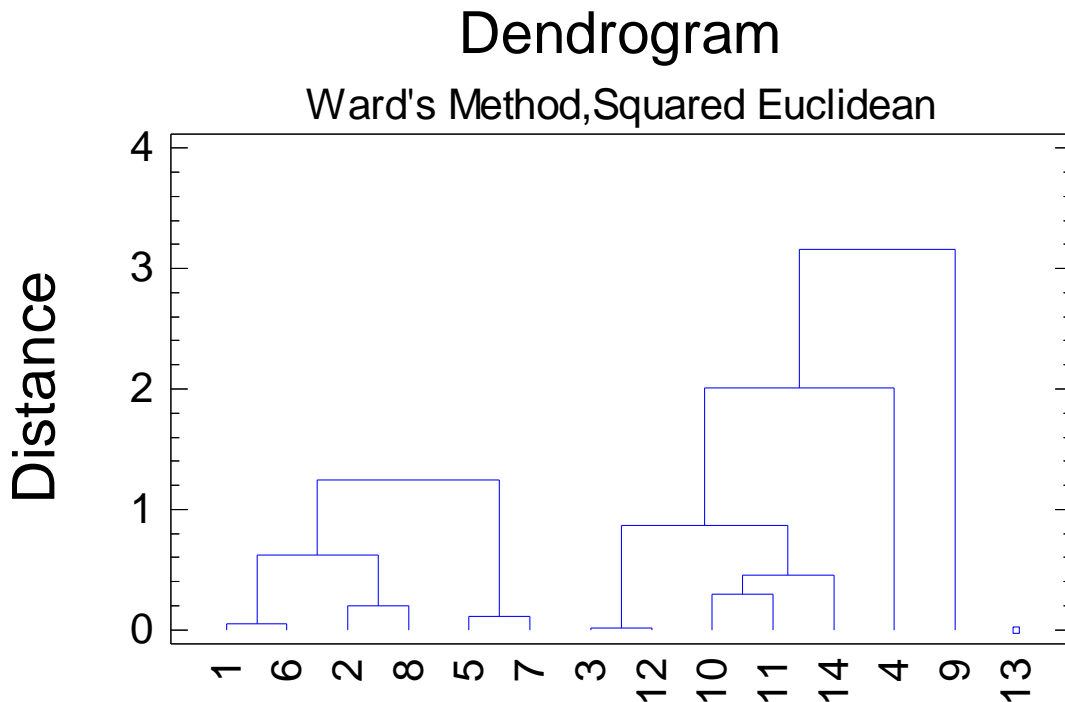


Рис. 2.7 Результаты кластеризации ЗНО по параметрам, представленным в таблице 2.7

Для построения модели оценки избыточного относительного онкологического риска для первого и второго кластеров необходимо определить формы дозовой зависимости  $p(D)$  и корректирующего множителя  $\varepsilon(e,s,a)$ . Отметим, что модель для третьего кластера (лейкемия) совпадает с выражением (2.4). Ввиду того, что классы заболеваний первого и второго кластера относят к группе солидных раков, то  $p(D)=\beta \cdot D$  (линейная форма зависимости от дозы). Для определения формы корректирующего множителя  $\varepsilon(e,s,a)$  необходимо изучить влияние факторов пола, возраста на момент облучения и предполагаемого возраста дожития на линейный коэффициент риска. На основе данных, представленных в таблицах 2.8-2.10, можно сделать заключение о наличии повышенной чувствительности к уровню радиационного воздействия у женского населения по сравнению с мужским, а также тенденции снижения радиационного риска в зависимости от возраста облученного и времени, прошедшего с момента облучения. Учитывая, что в 1945 году средний возраст жителей составлял 30 лет, а в 2003 году средний возраст доживших – 71 год, то для моделирования  $ERR(e,s,D,a)$  смертности от классов раковых заболеваний первого и второго кластеров выбрана следующая форма корректирующего множителя:

$$\varepsilon(e, s, a) = (1 + k_1 s) \cdot \exp(k_2 (e - 30) + k_3 \ln(\frac{a}{71})),$$

где  $s$  – фиктивная переменная, определяющая пол облученного ( $s=1$  для женщин,  $s=-1$  для мужчин,  $s=0$  для населения в целом).

Подобная форма корректирующего множителя выбрана из расчета того, что если оценивать уровень риска смерти от классов раковых заболеваний первого и второго кластеров для среднестатистического индивида до возраста 71 год, облученного в тридцатилетнем возрасте, то значение множителя  $\varepsilon(e,s,a)$  равно 1.

Таблица 2.8

Показатели радиационного риска в зависимости от пола облученного по кластерам

	$ERR_{IGp}$ ( $\Gamma p^{-1}$ ) для мужчин	$ERR_{IGp}$ ( $\Gamma p^{-1}$ ) для женщин
Кластер 1	0,21	0,45
Кластер 2	0,38	0,68

Показатели радиационного риска в зависимости от возраста облученного и периода, прошедшего с момента облучения для первого кластера

Время, прошедшее с момента облучения	Средний возраст доживших	$ERR_{IГp}$ (Гр <sup>-1</sup> ) для различных возрастных групп			
		0-20	20-40	40+	Население в целом
20 лет	45	1,05	0,56	0,45	0,47
40 лет	59	1,04	0,41	0,32	0,4
58 лет	71	0,64	0,16	0,2	0,31

Таблица 2.10

Показатели радиационного риска в зависимости от возраста облученного и периода, прошедшего с момента облучения для второго кластера

Время, прошедшее с момента облучения	Средний возраст доживших	$ERR_{IГp}$ (Гр <sup>-1</sup> ) для различных возрастных групп			
		0-20	20-40	40+	Население в целом
20 лет	45	1,35	0,78	0,38	0,86
40 лет	59	1,15	0,39	0,20	0,72
58 лет	71	0,92	0,20	0,20	0,56

В результате, для оценки избыточного относительного онкологического риска для первого и второго кластеров наиболее приемлемыми являются следующие модификации (коэффициенты детерминации моделей равны 0,75 и 0,9 соответственно):

$$ERR_{cl1}(e, s, D, a) = 0.33 \cdot D \cdot (1 + 0.36 \cdot s) \cdot \exp(-0.035 \cdot (e - 30) - 1.6 \cdot \ln(\frac{a}{71})), \quad (2.5)$$

$$ERR_{cl2}(e, s, D, a) = 0.53 \cdot D \cdot (1 + 0.28 \cdot s) \cdot \exp(-0.027 \cdot (e - 30) - 0.98 \ln(\frac{a}{71})), \quad (2.6)$$

В таблицах 2.11 и 2.12 представлены значения избыточного относительного риска на единицу дозу для населения в целом ( $s=0$ ) в зависимости от возраста на момент облучения и предполагаемого возраста дожития, рассчитанные по моделям 2.5 и 2.6. Для проверки адекватности полученных моделей на их основе, с учетом фоновой смертности от солидных раков, посчитано ожидаемое число избыточных случаев радиационно-обусловленных смертей в когорте выживших в

Японии. Расчетное число составляет 495 случая, при фактическом значении 501. Полученный результат свидетельствует о достаточной точности прогнозных значений радиационного риска и состоятельности представленных моделей.

Таблица 2.11

Уровень избыточного относительного риска на единицу дозы, рассчитанного по модели (2.5), в зависимости от возраста на момент облучения и предполагаемого возраста дожития

Возраст дожития (a) \ Возраст на момент облучения (e)	Возраст дожития				
	5	15	25	35	45
60	1,04	0,73	0,51	0,36	0,26
70	0,81	0,57	0,40	0,28	0,20
80	0,65	0,46	0,32	0,23	0,16
90	0,54	0,38	0,27	0,19	0,13

Таблица 2.12

Уровень избыточного относительного риска на единицу дозы, рассчитанного по модели (2.6), в зависимости от возраста на момент облучения и предполагаемого возраста дожития

Возраст дожития (a) \ Возраст на момент облучения (e)	Возраст дожития				
	5	15	25	35	45
60	1,23	0,94	0,72	0,55	0,42
70	1,06	0,81	0,62	0,47	0,36
80	0,93	0,71	0,54	0,41	0,31
90	0,83	0,63	0,48	0,37	0,28

#### **2.4 Сопоставление оценок пожизненного радиационного риска смерти от онкологических заболеваний, полученных согласно различным моделям для жителей России**

В рамках данного раздела произведен сопоставительный анализ оценок пожизненного радиационного риска для различных половозрастных групп жителей России, рассчитанных согласно моделям НКДАР ООН 2006 (выражения (2.3) и (2.4)), и их авторским модификациям (выражения (2.5) и (2.6)). С учетом

демографической структуры населения, рассчитаны усредненные значения рисков для всей популяции в целом. Эти результаты сопоставлены со значениями рисков, полученных на основе ЛБК (оценки пожизненного радиационного риска для всего населения (0-85 лет) и взрослого населения (18-64) для жителей России, как и для любых других популяций, согласно линейной беспороговой концепции (модель (1.29)) в случае острого облучения в области малых доз, представлены в таблице 1.3).

Исходные данные для получения модельных оценок радиационного риска в российской популяции представлены в приложении 2.2 (фоновая вероятность смерти от онкологических заболеваний мужчин и женщин в России в 5-летних возрастных группах (таблица П.2.4), коэффициенты дожития (таблица П.2.5), половозрастная структура населения (таблица П.2.6)). Все данные, используемые в расчетах, взяты за 2012 год. Согласно рекомендациям НКДАР ООН при оценке риска фоновые значения онкологической заболеваемости (смертности) следует моделировать в зависимости от возраста [136]. Для определения формы зависимости визуально проанализируем графики возрастных распределений вероятности смерти от лейкемии и солидных раковых заболеваний на примере мужчин России, представленных на рисунках 2.8 и 2.9 [23].

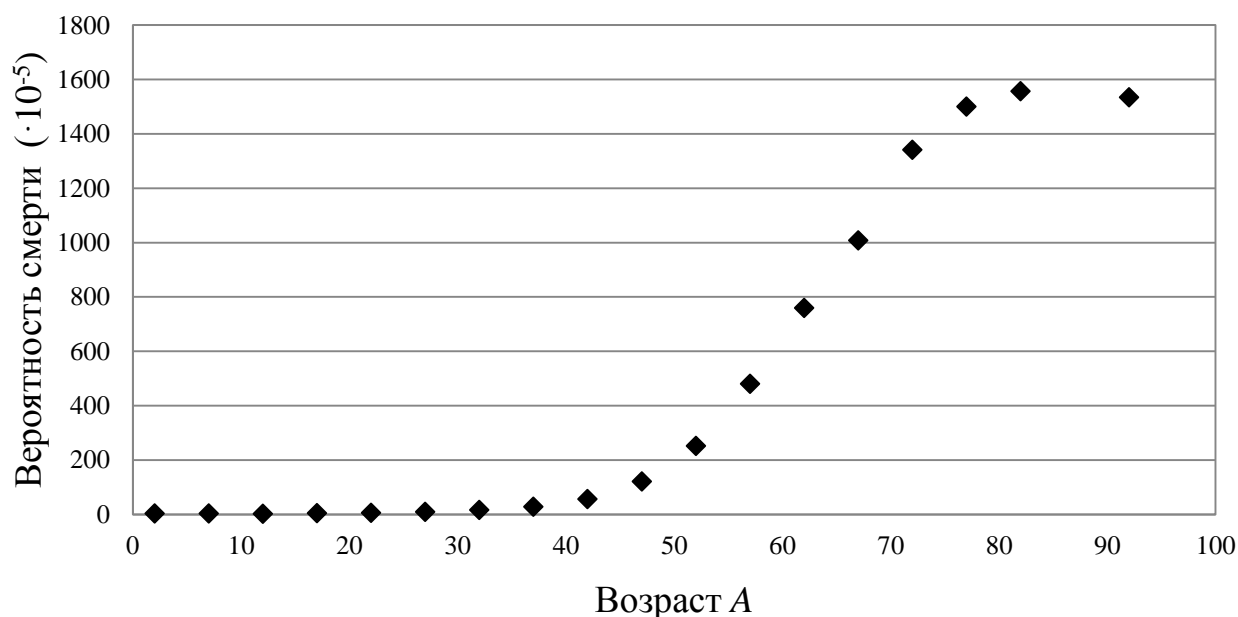


Рис. 2.8 Вероятность смерти от солидных раков в каждом возрасте среди мужчин в России [23]

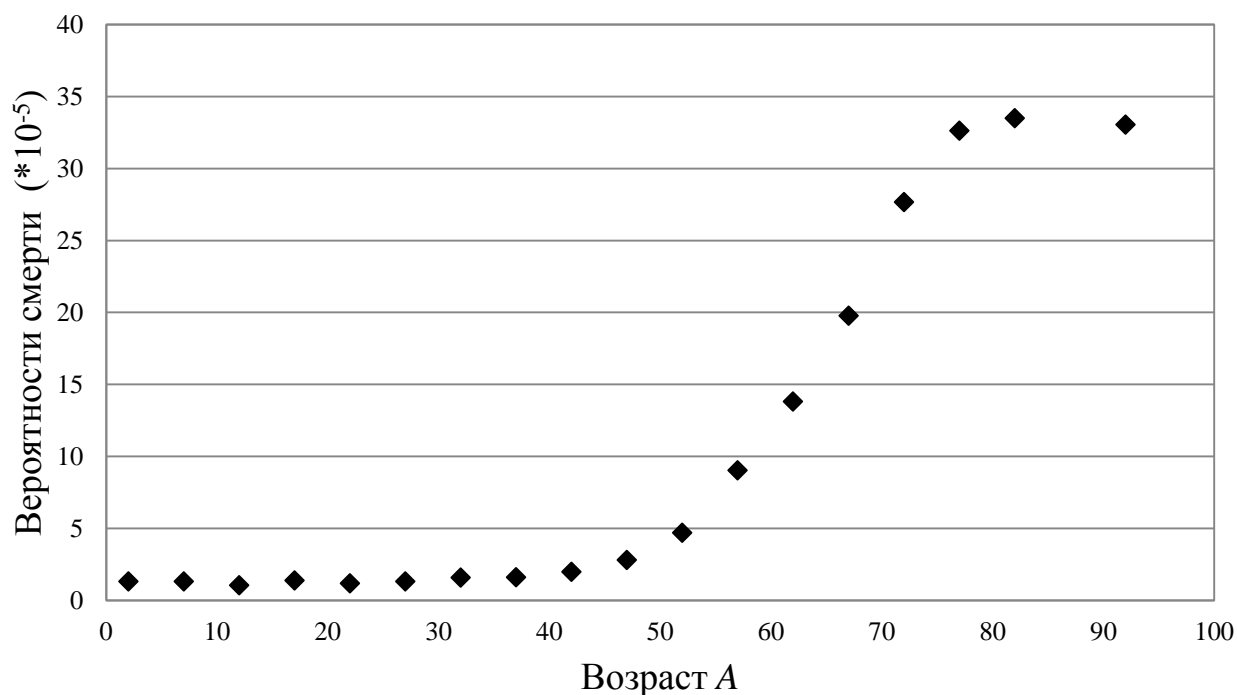


Рис. 2.9 Вероятность смерти от лейкемии в каждом возрасте среди мужчин в России [23]

Для моделирования вероятности смерти от онкологических заболеваний в зависимости от возраста  $A$  была выбрана логистическая кривая со структурными сдвигами. Модели для жителей России имеют следующий вид:

$$\lambda_{0solid}(male, Russia, A) = \left( \frac{0.066}{4.15 \cdot 10^{-5} + e^{-0.16A}} + 2.38 \cdot d \right) \cdot 10^{-5}, d = \begin{cases} 1, A \leq 50 \text{ лет} \\ 0, A > 50 \text{ лет} \end{cases}; \quad (2.7)$$

$$\lambda_{0leukemia}(male, Russia, A) = \left( \frac{1.8 \cdot 10^{-3}}{5.1 \cdot 10^{-5} + e^{-0.15A}} + (1.43 - 0.012A) \cdot d \right) \cdot 10^{-5}, \quad (2.8)$$

$$d = \begin{cases} 1, A \leq 50 \text{ лет} \\ 0, A > 50 \text{ лет} \end{cases};$$

$$\lambda_{0solid}(female, Russia, A) = \left( \frac{0.65}{7.4 \cdot 10^{-4} + e^{-0.11A}} \right) \cdot 10^{-5}; \quad (2.9)$$

$$\lambda_{0solid}(female, Russia, A) = \left( \frac{0.034}{1.2 \cdot 10^{-3} + e^{-0.096A}} + (1.1 - 0.024A) \cdot d_1 + (-0.71A + 57.6) \cdot d_2 \right) \cdot 10^{-5}, d_1 = \begin{cases} 1, A \leq 50 \text{ лет} \\ 0, A > 50 \text{ лет} \end{cases}, d_2 = \begin{cases} 0, A \leq 80 \text{ лет} \\ 1, A > 80 \text{ лет} \end{cases} \quad (2.10)$$



Модели (2.7-2.10) достаточно достоверно описывают процесс изменения вероятности смерти от онкологических заболеваний в зависимости от возраста  $A$  (коэффициенты детерминации моделей более 0,99). На рисунке 2.10 представлено графическое сопоставление фактических значения вероятности смерти от солидных раковых заболеваний среди мужчин в России и модельных значений, полученных на основе выражения (2.7).

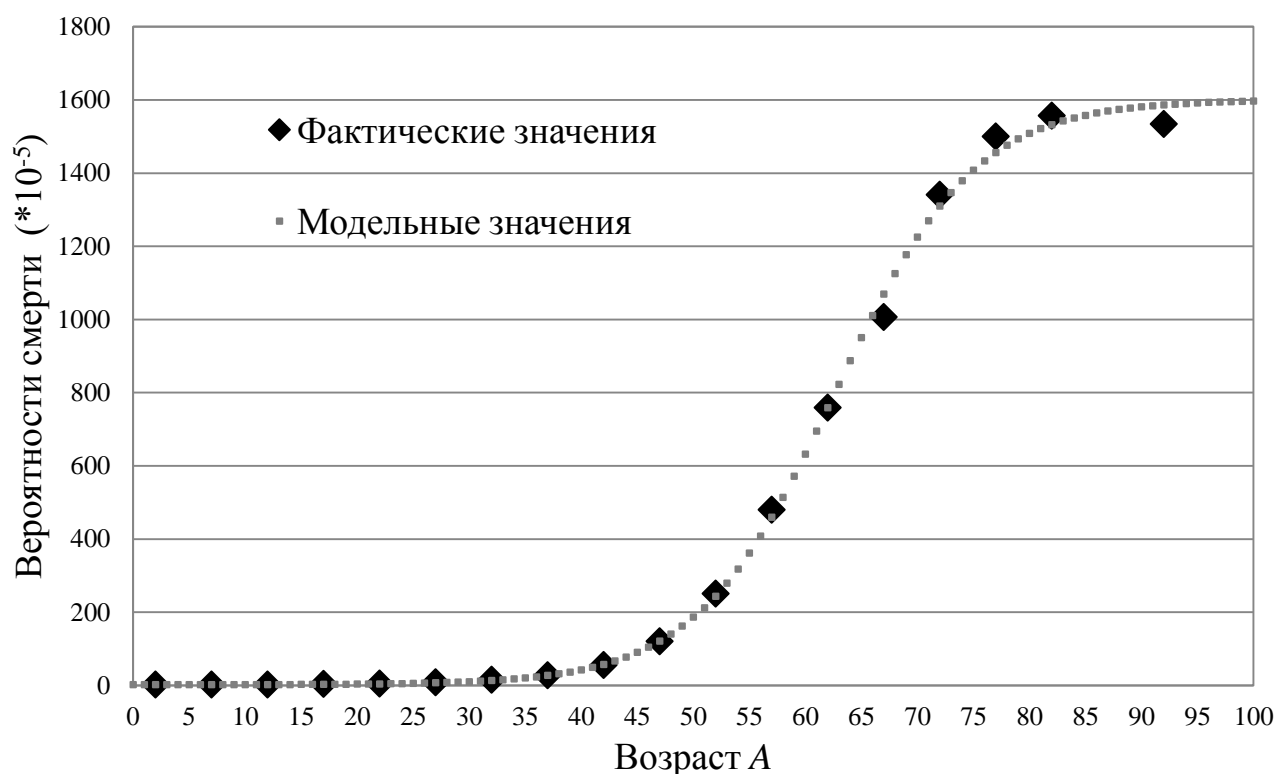


Рис. 2.10 Сопоставление фактических значений вероятности смерти от всех раковых заболеваний кроме лейкемии у мужчин в России и модельных значений, полученных на основе выражения 2.7

Отметим, что для получения оценок фоновой вероятности смерти от онкологических заболеваний в диапазоне лет от  $e$  до  $a$   $\lambda_0(e, s, c, a)$ , используемых в моделях (1.24) и (1.25), оценки, полученные на основе моделей (2.7-2.10), следует преобразовывать следующим образом:

$$\lambda_0(e, s, c, a) = \sum_{A=e}^a \lambda_0(s, c, A) \quad (2.11)$$

На рисунках 2.11-2.14 представлены уровни избыточного абсолютного радиационного риска в каждом возрасте  $A$  ( $EAR(e, s, c, D, A)$ ) после облучения

эквивалентной дозой  $D=200$  мЗв двадцатилетних российских мужчины и женщины, рассчитанные на основе моделей (2.3) и (2.4), предложенных в докладе НКДАР ООН, и их авторских модификаций (2.5) и (2.6), с учетом коэффициентов дожития (таблица П.2.5, приложение 2.2), с использованием выражений (1.34), (1.36) и (2.7-2.11). Соответствующим цветом на них отображен вклад каждого класса заболеваний в общую структуру радиационного риска (в частности, на рисунках 2.11 и 2.12 черным цветом – доля радиационно-обусловленных смертей от лейкемии, темно-серым цветом – от солидных раков; на рисунках 2.13 и 2.14 черным цветом – доля радиационно-обусловленных смертей третьего кластера заболеваний, темно-серым – второго кластера заболеваний, светло-серым – первого кластера заболеваний).

Значения пожизненного радиационного риска согласно этим моделям для среднестатистических мужчины и женщины, проживающих в России, в зависимости от возраста на момент облучения и дозы представлены в таблицах 2.13-2.16.

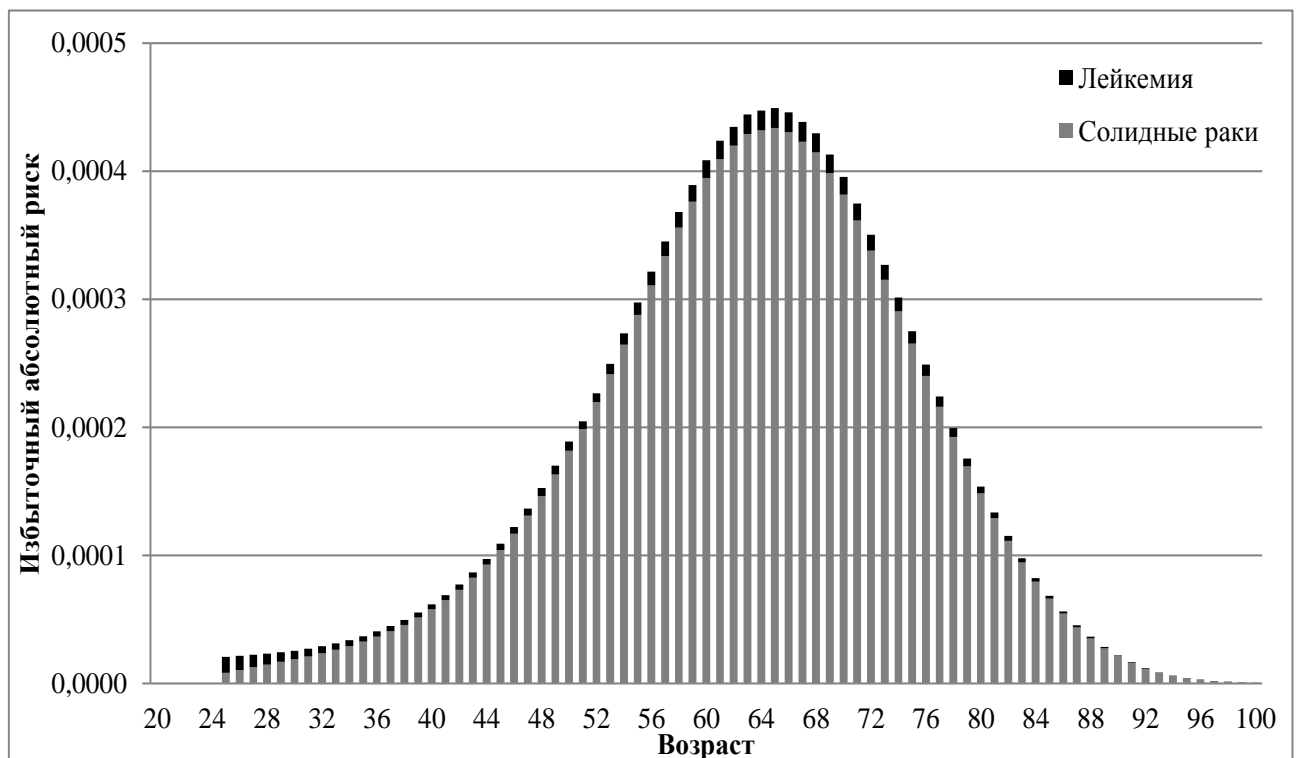


Рис. 2.11 Избыточный абсолютный радиационный риск смерти в каждом возрасте после облучения в 20 лет дозой 200 мЗв среднестатистического мужчины, проживающего в России, рассчитанный на основе моделей (2.3) и (2.4)

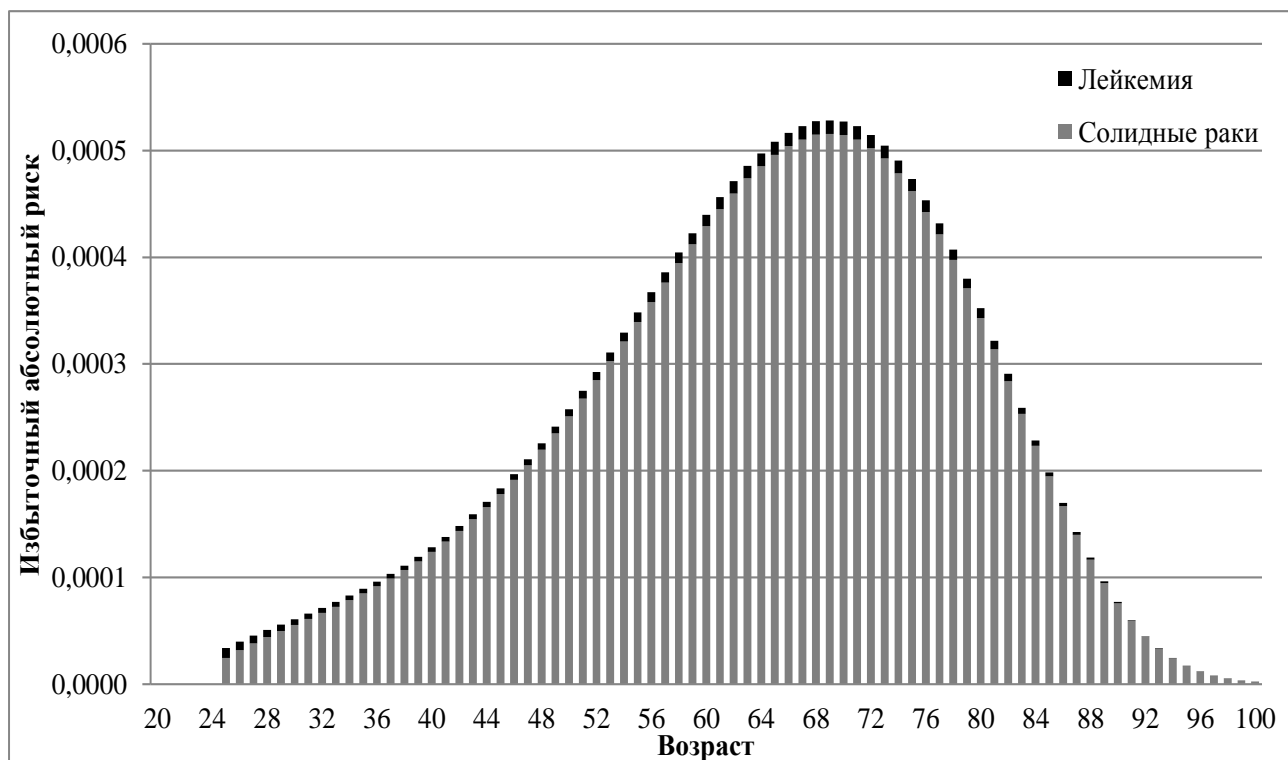


Рис. 2.12 Избыточный абсолютный радиационный риск в каждом возрасте после облучения в 20 лет дозой 200 мЗв среднестатистической женщины, проживающей в России, рассчитанный на основе моделей (2.3) и (2.4)

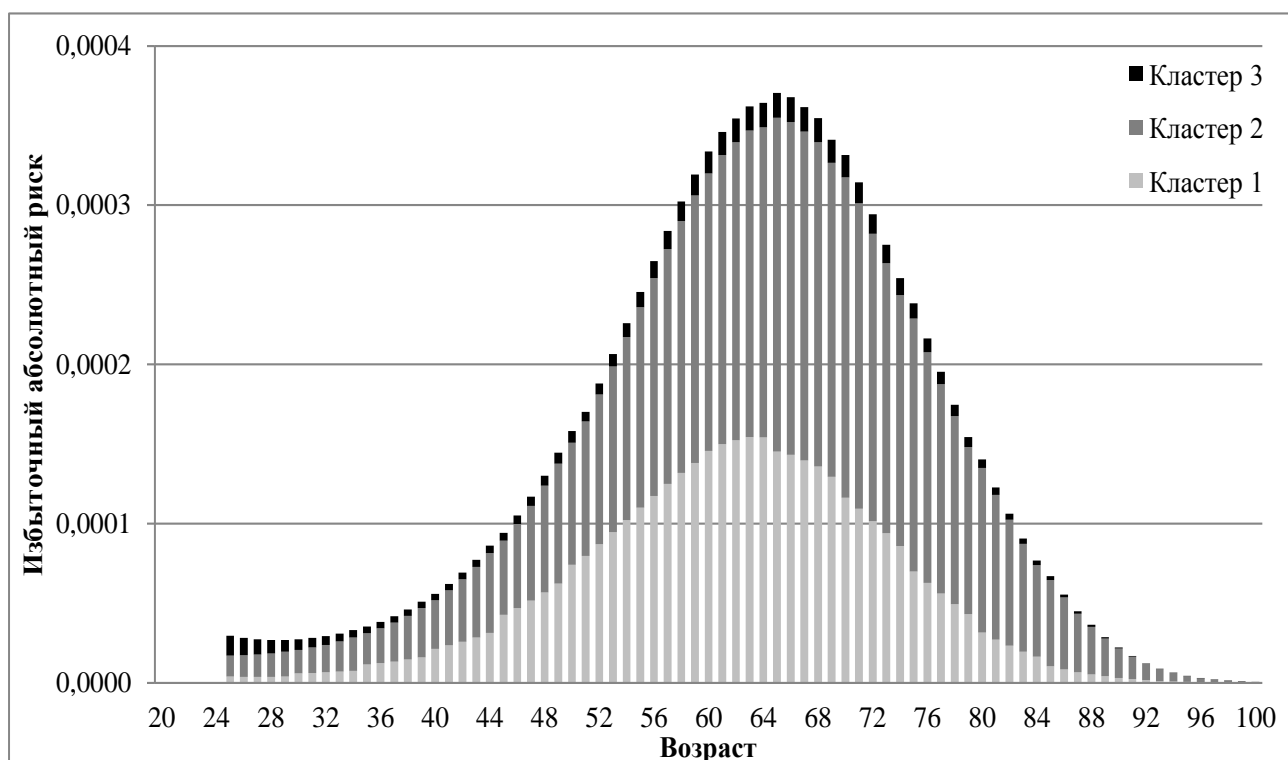


Рис. 2.13 Избыточный абсолютный радиационный риск в каждом возрасте после облучения в 20 лет дозой 200 мЗв среднестатистического мужчины, проживающего в России, рассчитанный на основе моделей (2.5) и (2.6)

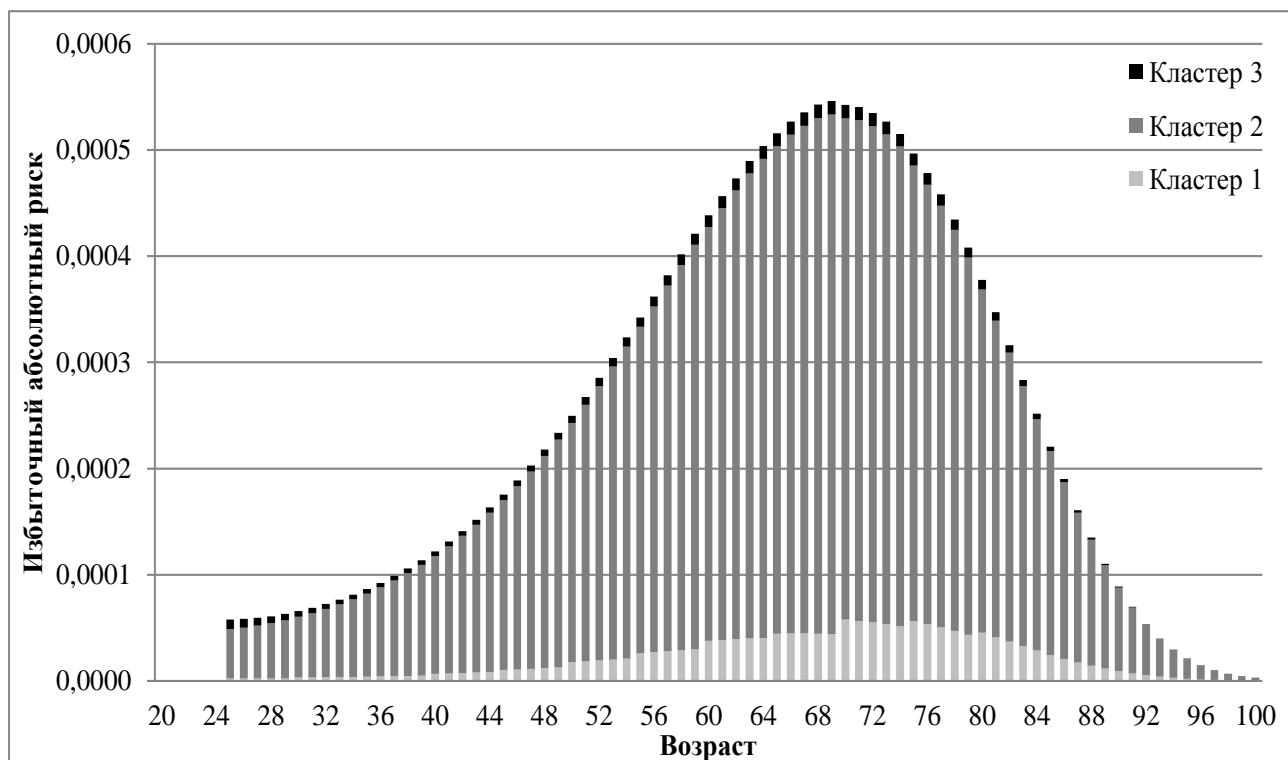


Рис. 2.14 Избыточный абсолютный радиационный риск в каждом возрасте после облучения в 20 лет дозой 200 мЗв среднестатистической женщины, проживающей в России, рассчитанный на основе моделей (2.5) и (2.6)

Таблица 2.13

Пожизненный радиационный риск, рассчитанный на основе моделей (2.3) и (2.4), для среднестатистического мужчины в России в зависимости от возраста на момент облучения и индивидуальной дозы

Доза (мЗв) \ Возраст на момент облучения	5	20	100	200	500	1000
15	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$6,81 \cdot 10^{-3}$	$1,36 \cdot 10^{-2}$	$3,41 \cdot 10^{-2}$	$6,82 \cdot 10^{-2}$
30	$2,62 \cdot 10^{-4}$	$1,05 \cdot 10^{-3}$	$5,26 \cdot 10^{-3}$	$1,05 \cdot 10^{-2}$	$2,65 \cdot 10^{-2}$	$5,34 \cdot 10^{-2}$
45	$1,87 \cdot 10^{-4}$	$7,48 \cdot 10^{-4}$	$3,76 \cdot 10^{-3}$	$7,54 \cdot 10^{-3}$	$1,91 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$
60	$9,3 \cdot 10^{-5}$	$3,73 \cdot 10^{-4}$	$1,88 \cdot 10^{-3}$	$3,79 \cdot 10^{-3}$	$9,73 \cdot 10^{-3}$	$2,03 \cdot 10^{-2}$
75	$2,24 \cdot 10^{-5}$	$8,99 \cdot 10^{-5}$	$4,55 \cdot 10^{-4}$	$9,26 \cdot 10^{-4}$	$2,43 \cdot 10^{-3}$	$5,23 \cdot 10^{-3}$

Таблица 2.14

Пожизненный радиационный риск, рассчитанный на основе моделей (2.3) и (2.4), для среднестатистической женщины в России в зависимости от возраста на момент облучения и индивидуальной дозы

Доза (мЗв) \ Возраст на момент облучения	5	20	100	200	500	1000
15	$5,01 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$9,99 \cdot 10^{-3}$	$1,99 \cdot 10^{-2}$	$4,95 \cdot 10^{-2}$	$9,77 \cdot 10^{-2}$
30	$3,85 \cdot 10^{-4}$	$1,54 \cdot 10^{-3}$	$7,7 \cdot 10^{-3}$	$1,54 \cdot 10^{-2}$	$3,84 \cdot 10^{-2}$	$7,64 \cdot 10^{-2}$
45	$2,63 \cdot 10^{-4}$	$1,05 \cdot 10^{-3}$	$5,26 \cdot 10^{-3}$	$1,05 \cdot 10^{-2}$	$2,64 \cdot 10^{-2}$	$5,33 \cdot 10^{-2}$
60	$1,29 \cdot 10^{-4}$	$5,18 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$5,22 \cdot 10^{-3}$	$1,33 \cdot 10^{-2}$	$2,71 \cdot 10^{-2}$
75	$2,97 \cdot 10^{-5}$	$1,19 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$1,21 \cdot 10^{-3}$	$3,12 \cdot 10^{-3}$	$6,55 \cdot 10^{-3}$

Таблица 2.15

Пожизненный радиационный риск, рассчитанный на основе авторских моделей (2.5) и (2.6), для среднестатистического мужчины в России в зависимости от возраста на момент облучения и индивидуальной дозы

Доза (мЗв) \ Возраст на момент облучения	5	20	100	200	500	1000
15	$3,07 \cdot 10^{-4}$	$1,23 \cdot 10^{-3}$	$6,14 \cdot 10^{-3}$	$1,23 \cdot 10^{-2}$	$3,08 \cdot 10^{-2}$	$6,19 \cdot 10^{-2}$
30	$2,03 \cdot 10^{-4}$	$8,12 \cdot 10^{-4}$	$4,07 \cdot 10^{-3}$	$8,18 \cdot 10^{-3}$	$2,07 \cdot 10^{-2}$	$4,21 \cdot 10^{-2}$
45	$1,37 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$2,77 \cdot 10^{-3}$	$5,57 \cdot 10^{-3}$	$1,42 \cdot 10^{-2}$	$2,94 \cdot 10^{-2}$
60	$7,42 \cdot 10^{-5}$	$2,97 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$3,04 \cdot 10^{-3}$	$7,86 \cdot 10^{-3}$	$1,66 \cdot 10^{-2}$
75	$2,17 \cdot 10^{-5}$	$8,71 \cdot 10^{-5}$	$4,41 \cdot 10^{-4}$	$8,98 \cdot 10^{-4}$	$2,36 \cdot 10^{-3}$	$5,09 \cdot 10^{-3}$

Таблица 2.16

Пожизненный радиационный риск, рассчитанный на основе авторских моделей (2.5) и (2.6), для среднестатистической женщины в России в зависимости от возраста на момент облучения и индивидуальной дозы

Доза (мЗв) \ Возраст на момент облучения	5	20	100	200	500	1000
15	$5,45 \cdot 10^{-4}$	$2,18 \cdot 10^{-3}$	$1,09 \cdot 10^{-2}$	$2,17 \cdot 10^{-2}$	$5,36 \cdot 10^{-2}$	$1,06 \cdot 10^{-1}$
30	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$1,44 \cdot 10^{-3}$	$7,2 \cdot 10^{-3}$	$1,44 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$7,18 \cdot 10^{-2}$
45	$2,29 \cdot 10^{-4}$	$9,17 \cdot 10^{-4}$	$4,59 \cdot 10^{-3}$	$9,21 \cdot 10^{-3}$	$2,32 \cdot 10^{-2}$	$4,69 \cdot 10^{-2}$
60	$1,18 \cdot 10^{-4}$	$4,73 \cdot 10^{-4}$	$2,38 \cdot 10^{-3}$	$4,78 \cdot 10^{-3}$	$1,22 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$
75	$3,25 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$6,56 \cdot 10^{-4}$	$1,33 \cdot 10^{-3}$	$3,41 \cdot 10^{-3}$	$7,12 \cdot 10^{-3}$

Средние пожизненные риски на 1 Зв облучения для населения России, рассчитанные с учетом половозрастной структуры жителей (таблица П.2.6, приложение 2.2) [79] и выражений (1.14),(1.15) и (1.37), с учетом оценок рисков, полученных согласно авторским моделям (2.5) и (2.6) незначительно уступают оценкам, полученным на основе моделей (2.3) и (2.4) НКДАР ООН, и равны соответственно  $4,91 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$  и  $5,23 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$ . Эти оценки не превышают среднемировые значения, представленные в докладе НКДАР ООН 2006 (таблица 2.17) [90,100,115]. Имеются различия и в значениях пожизненного радиационного риска на единицу дозы для различных возрастных групп в России и формах возрастных распределений, представленных на рисунках 2.11-2.14. Эти значения варьируются в диапазоне от  $0,54 \cdot 10^{-2}$  до  $9,47 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$  при расчете на основе моделей (2.3) и (2.4) НКДАР ООН и от  $0,65 \cdot 10^{-2}$  до  $10,2 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$  при расчете на основе авторских моделей (2.5) и (2.6) соответственно.

Для мужчин оценки радиационных рисков согласно авторскими моделям выше аналогичных оценок согласно моделям НКДАР ООН, а для женщин, напротив, ниже. Это уточнение обусловлено тем, что у мужчин в России большая доля онкологической смертности приходится на раки из группы раковых заболеваний 1 кластера, в частности раков легкого и желудка, а у женщин на раки груди.

Таблица 2.17

Значения  $REID_{138}$  для различных стран мира, рассчитанные на основе моделей (2.3) и (2.4) ( $\cdot 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$ ) [136]

Страна	Китай	Япония	США	Великобритания	Пуэрто-Рико	Среднее по миру
$REID_{138}$	5,02	5,62	5,9	6,14	4,52	5,5

Оценка эффекта при хроническом облучении индивида рассмотрена на примере расчета радиационного риска при облучении взрослого человека с 18 до 64 лет по 20 мЗв в течение каждого года жизни (предельная годовая доза облучения персонала). В этом случае, индивид за 47 лет жизни получит кумулятивную дозу 940 мЗв техногенного облучения.

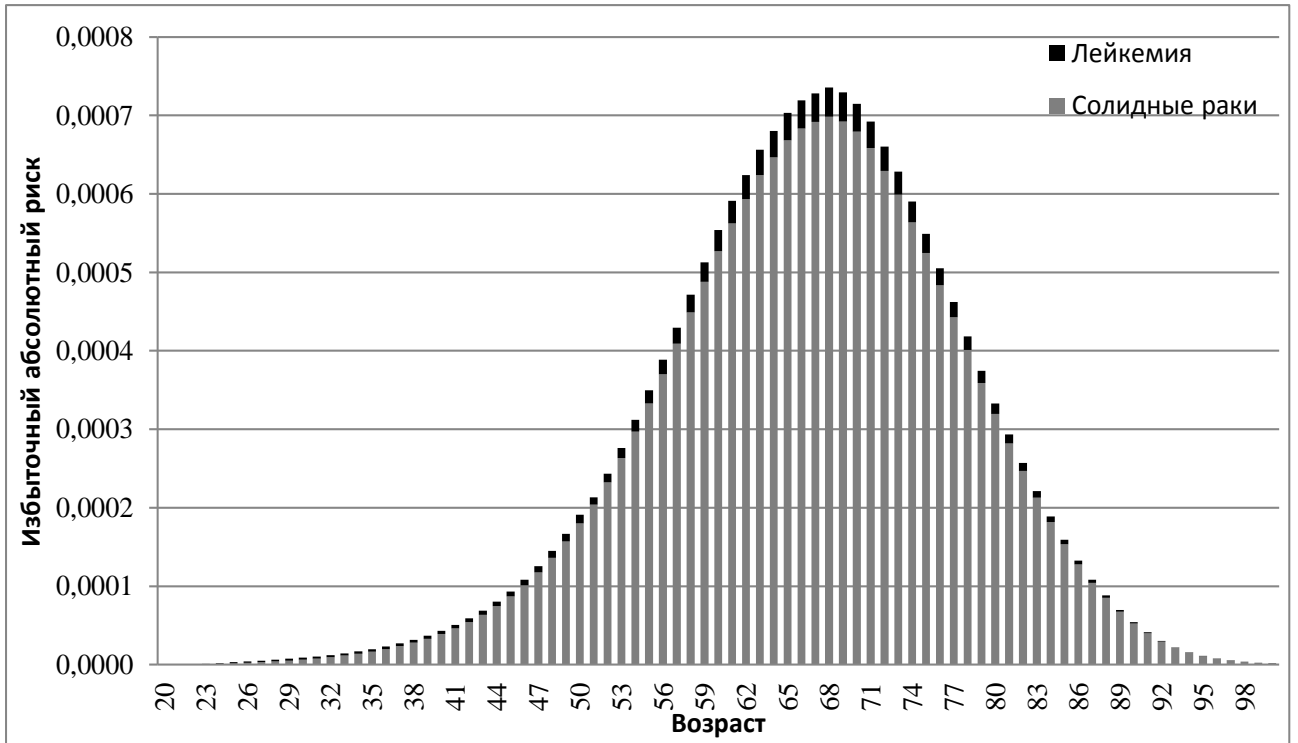


Рис.2.15 Избыточный абсолютный радиационный риск в каждом возрасте для среднестатистического мужчины, проживающего в России, подверженного радиационному воздействию по 20 мЗв в течение каждого года жизни с 18 до 64 лет, рассчитанный на основе моделей (2.3) и (2.4).

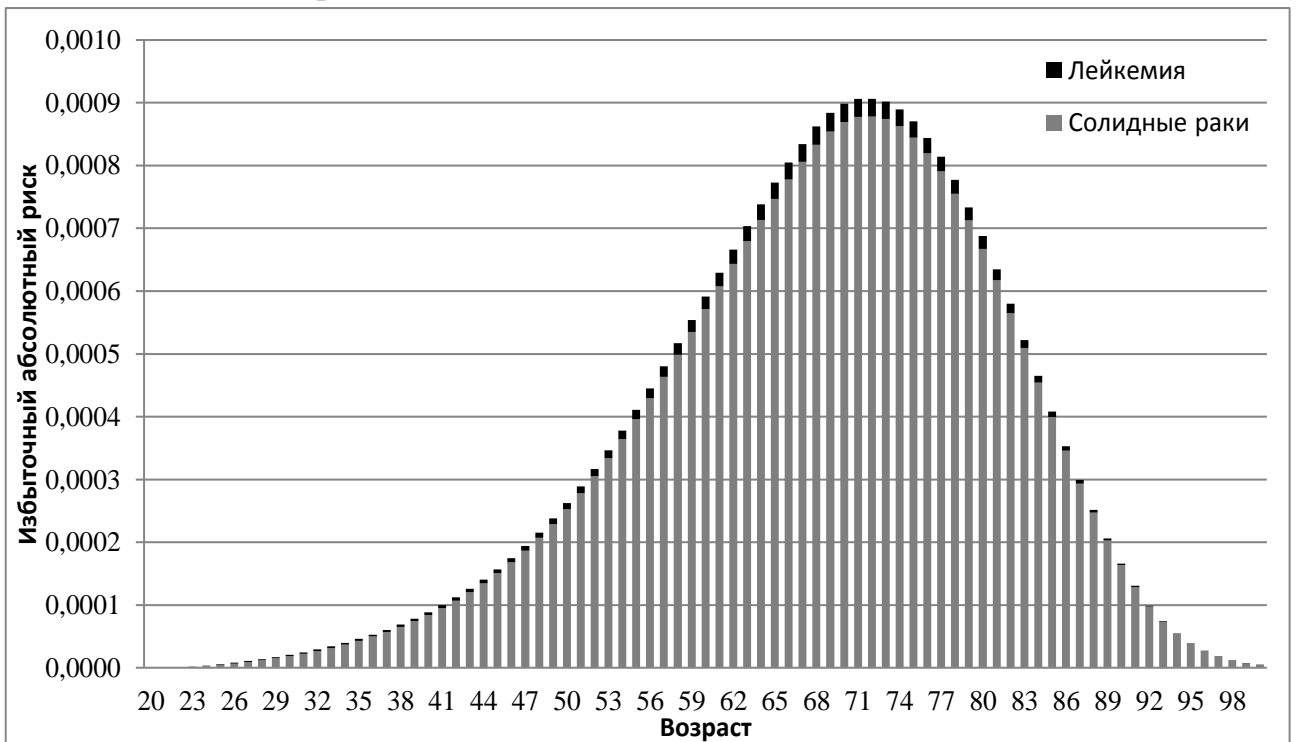


Рис.2.16 Избыточный абсолютный радиационный риск в каждом возрасте для среднестатистической женщины, проживающей в России, подверженной радиационному воздействию по 20 мЗв в течение каждого года жизни с 18 до 64 лет, рассчитанный на основе моделей (2.3) и (2.4)

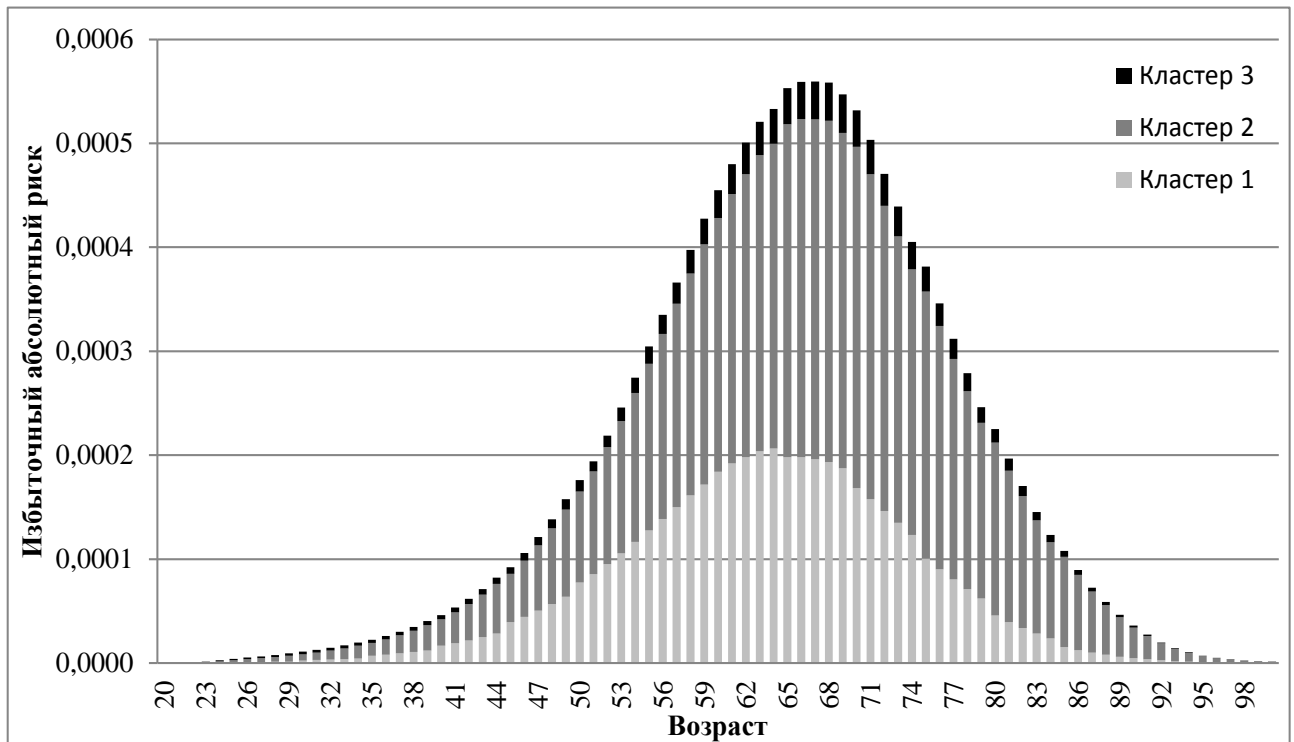


Рис.2.17 Избыточный абсолютный радиационный риск в каждом возрасте для среднестатистического мужчины, проживающего в России, подверженного радиационному воздействию по 20 мЗв в течение каждого года жизни с 18 до 64 лет, рассчитанный на основе авторских моделей (2.5) и (2.6).

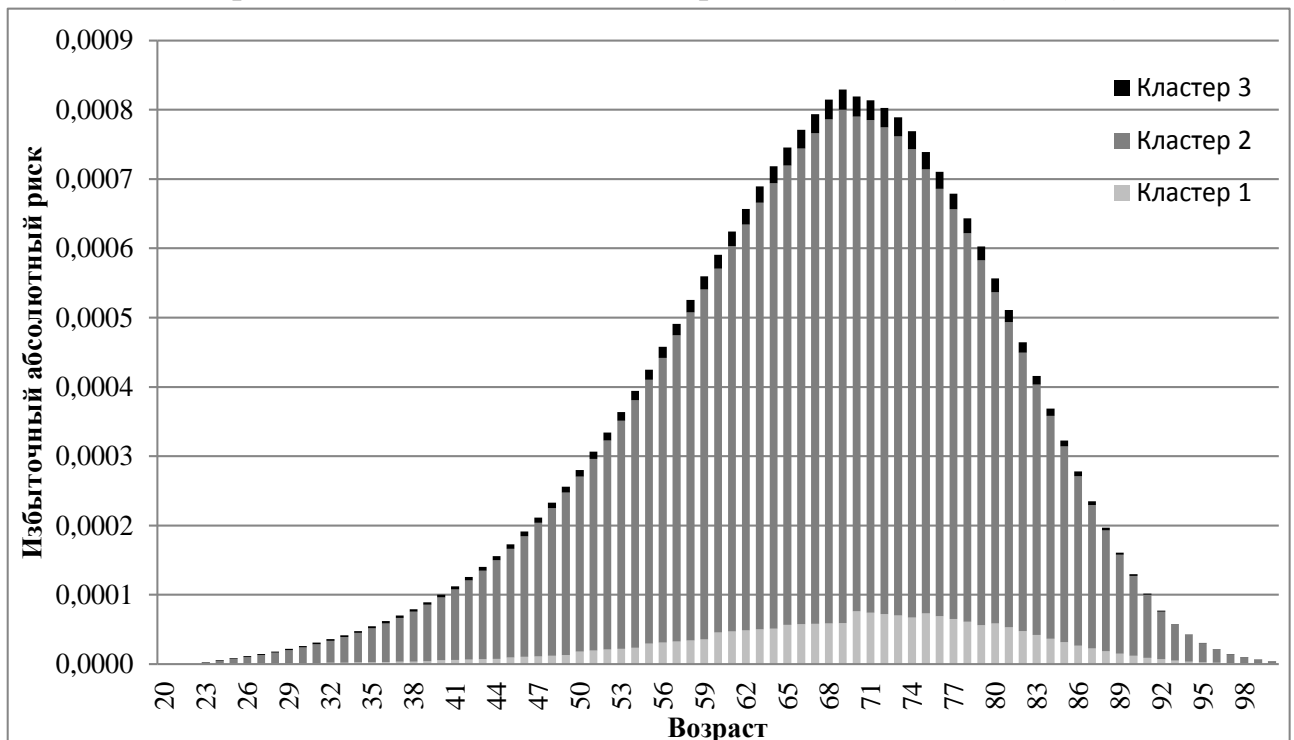


Рис.2.18 Избыточный абсолютный радиационный риск в каждом возрасте для среднестатистической женщины, проживающей в России, подверженной радиационному воздействию по 20 мЗв в течение каждого года жизни с 18 до 64 лет, рассчитанный на основе авторских моделей (2.5) и (2.6)



На рисунках 2.15-2.18 представлены уровни избыточного абсолютного радиационного риска в каждом возрасте  $A$  для вышеописанного сценария облучения индивида, рассчитанные на основе моделей (2.3) и (2.4), предложенных в докладе НКДАР ООН, и их авторских модификаций (2.5) и (2.6), с учетом выражений (1.34), (1.36), (1.40) и (2.7-2.11).

Значения пожизненного радиационного риска для среднестатистического жителя России для вышеописанного сценария хронического облучения, согласно моделям (2.3) и (2.4) НКДАР ООН и их авторским модификациям (2.5) и (2.6), равны  $2,2 \cdot 10^{-2}$  ( $1,8 \cdot 10^{-2}$  для мужчин и  $2,6 \cdot 10^{-2}$  для женщин) и  $1,98 \cdot 10^{-2}$  ( $1,47 \cdot 10^{-2}$  для мужчин и  $2,5 \cdot 10^{-2}$  для женщин) соответственно. При сопоставлении рисунков 2.11-2.14 и 2.15-2.18 видно, что при пролонгированном облучении модальный возраст проявления радиационного риска сдвигается вправо приблизительно на 5 лет.

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что уровни радиационного риска, рассчитанные на базе линейной беспороговой концепции, являются обоснованными для оценки коллективного риска в случае облучения больших групп людей. В случае оценки рисков для отдельных половозрастных групп более подходящими являются подходы, основанные на моделях (2.3) и (2.4) НКДАР ООН и их авторских модификаций (2.5) и (2.6). Значения оценок радиационного риска для среднестатистического жителя России, полученные на основе этих подходов, несколько ниже своих аналогов, полученных согласно методике ЛБК. Причиной этого может являться предположение, сделанное в публикации 103 МКРЗ, что уровни пожизненного радиационного риска, полученные на основе ЛБК, со временем могут быть снижены с ростом коэффициента излечиваемости онкологических заболеваний [44]. Отметим, что коэффициент летальности раковых заболеваний при современном уровне медицины в России на 17 % ниже коэффициента летальности в когорте выживших в Японии, на основе которой базируется ЛБК, и составляют 58% и 75% соответственно [23,136]. Еще одной причиной сниженных показателей радиационного риска, рассчитанных согласно моделям (2.3-2.6) для российской

популяции, может являться тот факт, что ожидаемая продолжительность жизни в России в среднем ниже по сравнению с развитыми странами.

Предлагаемый авторский подход оценки радиационного риска, основанный на кластеризации онкологических заболеваний, может внести определенный вклад в решение проблемы снижения радиационных рисков смертности. Заметим, что вошедшие во второй кластер классы раковых заболеваний, при современном уровне медицины, относят к излечиваемым (коэффициент летальности менее 50%). Этот коэффициент может быть еще более снижен за счет своевременной диагностики онкологических заболеваний. Наиболее хорошо потенциал этого снижения виден в структуре радиационного риска смертности среди женщин в России (рисунок 2.14, 2.18), ввиду того, что около 55% смертей в общей структуре новообразований у женского пола приходится на раки кожи, молочной железы и половой системы, входящих во второй кластер онкологических заболеваний.

## **2.5 Временная и стоимостная оценка ущерба потерь здоровья населения в России от радиационного воздействия**

В данном разделе на основе возрастных распределений радиационного риска, полученных для жителей России согласно различным методикам, с использованием выражения (1.38), получены индивидуализированные оценки ожидаемых потерь человек-лет жизни для различных половозрастных групп, а также усредненная оценка риска для всей популяции.

В таблицах 2.18 и 2.19 представлены значения  $LLE_{13e}$  и  $REID_{13e}$ , рассчитанные для различных половозрастных групп и населения России в целом при однократном остром облучении с учетом половозрастной структуры населения (таблица П.2.6, приложение 2.2). Значение предельного возраста комфортного существования человека  $A_i$ , используемого в выражениях (1.37) и (1.38), принято равным 80 годам, так как во многих развитых странах этот возраст соответствует ожидаемой продолжительности жизни населения. Отметим, что отношение показателей  $REID_{13e}$  и  $LLE_{13e}$  характеризует ожидаемую потерю лет

жизни среднестатистического индивида в случае проявления стохастического эффекта.

Усредненный ожидаемый ущерб, рассчитанный на основе моделей НКДАР ООН и их авторским модификациям при остром облучении коллективной дозой 1 чел.-Зв жителей в России, эквивалентен потерям 0,79 и 0,75 чел.-лет жизни соответственно. Таким образом, натуральный показатель радиационного риска, рассчитанный по данным моделям на 20-25% меньше оценки, используемой в ЛБК, где облучение коллективной дозой 1 чел.-Зв эквивалентно потерям 1 чел.-года жизни. На наш взгляд, полученные альтернативными ЛБК методами оценки натурального ущерба являются более обоснованными для определения уровней радиационного риска среди жителей России. Усредненные оценки потерь лет жизни для всего населения в случае проявления радиационно-обусловленного рака вследствие облучения соответственно равны 15,1 и 15,2 лет, что эквивалентно предпосылкам ЛБК, где это значение взято равным 15 годам.

Таблица 2.18

Характеристики радиационного риска для различных половозрастных групп при остром облучении, рассчитанные согласно моделям НКДАР ООН, для российской популяции

Возрастная группа	Мужчины			Женщины			Население в целом		
	REID <sub>13в</sub>	LLE <sub>13в</sub>	$\frac{LLE_{13в}}{REID_{13в}}$	REID <sub>13в</sub>	LLE <sub>13в</sub>	$\frac{LLE_{13в}}{REID_{13в}}$	REID <sub>13в</sub>	LLE <sub>13в</sub>	$\frac{LLE_{13в}}{REID_{13в}}$
0-9	$7,83 \cdot 10^{-2}$	1,540	19,7	$1,12 \cdot 10^{-1}$	2,164	19,4	$9,47 \cdot 10^{-2}$	1,844	19,5
10-19	$6,82 \cdot 10^{-2}$	1,271	18,6	$9,77 \cdot 10^{-2}$	1,752	17,9	$8,26 \cdot 10^{-2}$	1,506	18,2
20-29	$5,81 \cdot 10^{-2}$	1,002	17,2	$8,36 \cdot 10^{-2}$	1,339	16	$7,07 \cdot 10^{-2}$	1,168	16,5
30-39	$4,9 \cdot 10^{-2}$	0,762	15,5	$6,91 \cdot 10^{-2}$	0,945	13,7	$5,92 \cdot 10^{-2}$	0,855	14,5
40-49	$3,9 \cdot 10^{-2}$	0,508	13	$5,33 \cdot 10^{-2}$	0,572	10,7	$4,64 \cdot 10^{-2}$	0,541	11,7
50-59	$2,68 \cdot 10^{-2}$	0,248	9,2	$3,59 \cdot 10^{-2}$	0,254	7,1	$3,18 \cdot 10^{-2}$	0,251	7,9
60-69	$1,42 \cdot 10^{-2}$	0,062	4,3	$1,9 \cdot 10^{-2}$	0,060	3,2	$1,71 \cdot 10^{-2}$	0,061	3,6
70+	$2,74 \cdot 10^{-3}$	0,003	1,1	$6,55 \cdot 10^{-3}$	0,003	0,4	$5,43 \cdot 10^{-3}$	0,003	0,5
Все возраста	$4,32 \cdot 10^{-2}$	0,687	15,9	$6,11 \cdot 10^{-2}$	0,896	14,7	$5,23 \cdot 10^{-2}$	0,790	15,1

Значения  $LLE_{13в}$  для различных возрастных групп, рассчитанные согласно методике НКДАР ООН, варьируются в диапазоне от 0,003 чел.-лет/чел.-Зв для жителей старше 70 лет до 1,844 чел.-лет/чел.-Зв для детей до 10 лет. Аналогичные значения, рассчитанные согласно авторским моделям варьируются в диапазоне от

0,003 до 1,816 чел.-лет/чел.-Зв соответственно. Значения временных потерь, рассчитанных для населения мужского пола согласно авторским моделям ниже аналогичных значений, полученных согласно моделям НКДАР ООН, в то время как для населения женского пола, напротив, выше. Усредненные для обоих полов оценки согласно авторским моделям практически во всех возрастных группах превосходят оценки согласно моделям НКДАР ООН, причем максимальная разница получена для возрастных групп от 20 до 29 лет.

Таблица 2.19

Характеристики радиационного риска для различных половозрастных групп при остром облучении, рассчитанные согласно авторским моделям, для российской популяции

Возрастная группа	Мужчины			Женщины			Население в целом		
	REID <sub>13в</sub>	LLE <sub>13в</sub>	$\frac{LLE_{13в}}{REID_{13в}}$	REID <sub>13в</sub>	LLE <sub>13в</sub>	$\frac{LLE_{13в}}{REID_{13в}}$	REID <sub>13в</sub>	LLE <sub>13в</sub>	$\frac{LLE_{13в}}{REID_{13в}}$
0-9	$7,63 \cdot 10^{-2}$	1,413	18,5	$1,3 \cdot 10^{-1}$	2,242	17,2	$1,02 \cdot 10^{-1}$	1,816	17,7
10-19	$6,19 \cdot 10^{-2}$	1,119	18,1	$1,06 \cdot 10^{-1}$	1,775	16,7	$8,33 \cdot 10^{-2}$	1,440	17,2
20-29	$4,76 \cdot 10^{-2}$	0,825	17,3	$8,18 \cdot 10^{-2}$	1,308	16,0	$6,45 \cdot 10^{-2}$	1,063	16,5
30-39	$3,76 \cdot 10^{-2}$	0,612	16,3	$6,29 \cdot 10^{-2}$	0,921	14,6	$5,04 \cdot 10^{-2}$	0,769	15,2
40-49	$2,94 \cdot 10^{-2}$	0,420	14,3	$4,69 \cdot 10^{-2}$	0,578	12,3	$3,85 \cdot 10^{-2}$	0,502	13,0
50-59	$2,11 \cdot 10^{-2}$	0,220	10,4	$3,21 \cdot 10^{-2}$	0,278	8,6	$2,72 \cdot 10^{-2}$	0,252	9,3
60-69	$1,22 \cdot 10^{-2}$	0,057	4,7	$1,82 \cdot 10^{-2}$	0,070	3,9	$1,58 \cdot 10^{-2}$	0,065	4,1
70+	$5,09 \cdot 10^{-3}$	0,003	0,6	$7,12 \cdot 10^{-3}$	0,003	0,4	$6,52 \cdot 10^{-3}$	0,003	0,5
Все возраста	$3,92 \cdot 10^{-2}$	0,638	16,3	$5,78 \cdot 10^{-2}$	0,841	14,6	$4,91 \cdot 10^{-2}$	0,747	15,2

Таблица 2.20

Распределение ожидаемого натурального ущерба для жителей России в целом при облучении в коллективной дозе 1 чел.-Зв по кластерам, рассчитанного согласно авторским моделям ( $LLE_{13в}$ , чел.-лет/чел.-Зв)

Возрастная группа	Мужчины			Женщины			Население в целом		
	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
0-9	0,477	0,793	0,144	0,128	2,002	0,112	0,298	1,391	0,127
10-19	0,368	0,630	0,121	0,098	1,579	0,098	0,230	1,102	0,108
20-29	0,259	0,468	0,098	0,068	1,158	0,082	0,160	0,814	0,089
30-39	0,182	0,347	0,084	0,045	0,806	0,070	0,109	0,584	0,076
40-49	0,114	0,236	0,070	0,027	0,497	0,054	0,066	0,375	0,061
50-59	0,048	0,125	0,047	0,012	0,234	0,033	0,027	0,187	0,038
60+	0,002	0,018	0,009	0,001	0,029	0,007	0,001	0,026	0,007
Все возрастные группы	0,196	0,361	0,081	0,044	0,741	0,056	0,111	0,569	0,067

В таблице 2.20 представлено распределение по трем кластерам временных потерь жизни населения, обусловленных радиационным воздействием, полученных по авторским моделям (2.5) и (2.6) и модели НКДАР ООН для лейкемии (2.4).

Сравним полученные значения ущерба здоровью населения в России со среднемировыми значениями, представленными в докладе НКДАР ООН 2006 (таблица 2.21). Согласно этим данным уровень радиационного риска для российской популяции эквивалентен оценкам, полученным для жителей Пуэрто-Рико, и уступает значениям, подсчитанных для остальных стран. Очевидно, что при оценке популяционных рисков наибольший вклад вносят ожидаемая продолжительность жизни населения и фоновая онкологическая смертность.

Таблица 2.21

Оценка ожидаемой потери чел.-лет жизни населения (НКДАР ООН) различных стран на 1 чел.-Зв облучения в зависимости от возраста на момент облучения[97,136]

Возрастная группа (возраст на момент облучения)	Китай	Япония	США	Великобритания	Пуэрто-Рико
0-9	2,236	2,488	2,520	2,546	1,807
10-19	1,660	1,920	1,939	1,931	1,354
20-29	1,208	1,462	1,474	1,467	1,018
30-39	0,809	1,039	1,048	1,047	0,722
40-49	0,476	0,670	0,670	0,743	0,467
50-59	0,242	0,378	0,366	0,369	0,263
60+	0,095	0,178	0,164	0,163	0,126
Средний риск для всей популяции	0,875	1,002	1,041	1,027	0,749

В таблицах 2.22 и 2.23 представлены значения  $LLE_{136}$  для различных половозрастных групп и населения в среднем, проживающих в России, при хроническом облучении коллективной дозой 1 чел.-Зв (с учетом коэффициента DDREF). Ожидаемый ущерб, рассчитанный на основе моделей (2.3) и (2.4) НКДАР ООН и их авторским модификациям (2.5) и (2.6) при хроническом облучении коллективной дозой 1 чел.-Зв населения в России в среднем, эквивалентен 0,381 и 0,362 чел.-лет жизни соответственно. Значения данного показателя для различных возрастных групп, рассчитанные по данным

методикам, варьируются в диапазоне от 0,001 до 0,906 чел.-лет жизни и от 0 до 0,898 чел.-лет соответственно.

Таблица 2.22

Характеристики радиационного риска для различных половозрастных групп при хроническом облучении, рассчитанные на основе моделей НКДАР ООН, для российской популяции

Возрастная группа	Мужчины			Женщины			Население в целом		
	REID <sub>13в</sub>	LLE <sub>13в</sub>	$\frac{LLE_{13в}}{REID_{13в}}$	REID <sub>13в</sub>	LLE <sub>13в</sub>	$\frac{LLE_{13в}}{REID_{13в}}$	REID <sub>13в</sub>	LLE <sub>13в</sub>	$\frac{LLE_{13в}}{REID_{13в}}$
0-9	$3,94 \cdot 10^{-2}$	0,743	18,88	$5,78 \cdot 10^{-2}$	1,076	18,63	$4,83 \cdot 10^{-2}$	0,906	18,73
10-19	$3,40 \cdot 10^{-2}$	0,611	17,96	$5,01 \cdot 10^{-2}$	0,866	17,30	$4,19 \cdot 10^{-2}$	0,736	17,57
20-29	$2,87 \cdot 10^{-2}$	0,479	16,69	$4,24 \cdot 10^{-2}$	0,657	15,49	$3,55 \cdot 10^{-2}$	0,567	15,98
30-39	$2,39 \cdot 10^{-2}$	0,360	15,04	$3,46 \cdot 10^{-2}$	0,457	13,22	$2,93 \cdot 10^{-2}$	0,409	13,95
40-49	$1,87 \cdot 10^{-2}$	0,234	12,51	$2,63 \cdot 10^{-2}$	0,271	10,30	$2,26 \cdot 10^{-2}$	0,253	11,18
50-59	$1,25 \cdot 10^{-2}$	0,108	8,65	$1,73 \cdot 10^{-2}$	0,115	6,67	$1,52 \cdot 10^{-2}$	0,112	7,40
60-69	$6,41 \cdot 10^{-3}$	0,024	3,75	$8,92 \cdot 10^{-3}$	0,025	2,75	$7,92 \cdot 10^{-3}$	0,024	3,08
70+	$2,25 \cdot 10^{-3}$	0,001	0,32	$2,97 \cdot 10^{-3}$	0,001	0,20	$2,76 \cdot 10^{-3}$	0,001	0,23
Все возраста	$2,13 \cdot 10^{-2}$	0,326	15,32	$3,08 \cdot 10^{-2}$	0,438	14,22	$2,61 \cdot 10^{-2}$	0,381	14,61

Таблица 2.23

Характеристики радиационного риска для различных половозрастных групп при хроническом облучении, рассчитанные на основе авторских моделей, для российской популяции

Возрастная группа	Мужчины			Женщины			Население в целом		
	EAR <sub>13в</sub>	LLE <sub>13в</sub>	$\frac{LLE_{13в}}{ERR_{13в}}$	EAR <sub>13в</sub>	LLE <sub>13в</sub>	$\frac{LLE_{13в}}{ERR_{13в}}$	EAR <sub>13в</sub>	LLE <sub>13в</sub>	$\frac{LLE_{13в}}{ERR_{13в}}$
0-9	$3,82 \cdot 10^{-2}$	0,683	17,88	$6,75 \cdot 10^{-2}$	1,124	16,65	$5,25 \cdot 10^{-2}$	0,898	17,11
10-19	$3,07 \cdot 10^{-2}$	0,538	17,55	$5,45 \cdot 10^{-2}$	0,885	16,25	$4,23 \cdot 10^{-2}$	0,707	16,73
20-29	$2,31 \cdot 10^{-2}$	0,393	17,00	$4,14 \cdot 10^{-2}$	0,646	15,60	$3,22 \cdot 10^{-2}$	0,518	16,11
30-39	$1,79 \cdot 10^{-2}$	0,289	16,08	$3,13 \cdot 10^{-2}$	0,450	14,37	$2,47 \cdot 10^{-2}$	0,370	14,98
40-49	$1,38 \cdot 10^{-2}$	0,195	14,15	$2,29 \cdot 10^{-2}$	0,278	12,14	$1,85 \cdot 10^{-2}$	0,238	12,86
50-59	$9,59 \cdot 10^{-3}$	0,099	10,33	$1,54 \cdot 10^{-2}$	0,131	8,56	$1,28 \cdot 10^{-2}$	0,117	9,15
60-69	$5,4 \cdot 10^{-3}$	0,025	4,61	$8,53 \cdot 10^{-3}$	0,032	3,81	$7,28 \cdot 10^{-3}$	0,029	4,04
70+	$2,18 \cdot 10^{-3}$	0,000	0,00	$3,26 \cdot 10^{-3}$	0,000	0,00	$2,94 \cdot 10^{-3}$	0,000	0,00
Все возраста	$1,78 \cdot 10^{-2}$	0,28	15,77	$3,09 \cdot 10^{-2}$	0,446	14,44	$2,44 \cdot 10^{-2}$	0,362	14,87

На основе полученных натуральных показателей потерь здоровья населения рассчитаны стоимостные оценки радиационного риска для жителей России. В предположении, что стоимость года жизни эквивалентна годовому среднему национальному доходу, значение которого согласно данным

Всемирного Банка (World Bank) в России в 2012 году составлял приблизительно 13 тыс. долл. США, стоимостные эквиваленты ущерба от коллективной дозы облучения 1 чел.-Зв ( $VE$ ) для российской популяции при остром и хроническом облучениях, рассчитанные согласно выражению (1.20) при  $k=1$ , с учетом  $LLE_{13e}$  для этих типов облучения приблизительно равных 0,8 и 0,4 чел.-лет/чел.-Зв, составляют 10,4 и 5,2 тыс. долл. США/чел.-Зв соответственно. Стоимостные показатели можно также рассчитать отдельно для различных половозрастных групп, используя значения  $LLE_{13e}$  из таблиц 2.18, 2.19, 2.22, 2.23. Так, например, значение  $VE$  для детей до 18 лет приблизительно равно 24,5 тыс. долл. США/чел.-Зв при остром и 11,7 тыс. долл. США/чел.-Зв при хроническом облучениях, а усредненное значение для женщин детородного возраста (до 40 лет) – 17,4 и 8,5 тыс. долл. США/чел.-Зв.

Рассчитанные в этой главе показатели радиационного риска в дальнейшем используются для оценки эффективности различных мер вмешательств и формировании стратегии по устранению последствий радиационных аварий на территории Российской Федерации.

## **Глава 3 Методы оценки эффективности защитных мероприятий по устранению последствий крупных радиационных аварий**

### **3.1 Оценка эффективности мероприятий по устранению последствий аварии на Чернобыльской АЭС**

В современном мире техногенные и природные катастрофы наносят серьезный ущерб экономике многих стран. В последнее время количество чрезвычайных ситуации в России значительно возросло и, по оценкам специалистов, среднегодовая величина ущерба от них в 2000-х годах варьировалась от 3 до 7% ВВП [12]. Нередкими являются и инциденты на атомных промышленных объектах. Помимо общеизвестных аварий на Чернобыльской АЭС и ПО «Маяк» в России (и бывшем СССР) всего было зарегистрировано более 250 инцидентов с незапланированным выбросом радиации, некоторые из них с летальными исходами. Причинами большинства таких инцидентов (более 80%) послужили ошибки персонала [38]. В АЭС нового поколения большинство естественных процессов автоматизировано, что в значительной степени снизило влияние человеческого фактора на их безопасность [61]. Тем не менее, авария на АЭС «Фукусима-1» наглядно продемонстрировала возможность техногенной аварии вследствие крупной природной катастрофы (цунами). Наличие рисков техногенных катастроф на атомных промышленных объектах, а также совершения террористических актов с распространением радиации, ставят перед научными сообществами задачу создания четких руководств по устранению их последствий с критерием минимизации реальных рисков здоровью населения.

Отсутствие системы управления рисками в 80-е годы прошлого столетия при чрезвычайных ситуациях с выбросом радиации, вероятно, стало причиной некоторых ошибочных решений при устранении последствий аварии на Чернобыльской АЭС. По оценкам специалистов ИБРАЭ РАН (Институт проблем безопасного развития атомной энергетики, созданного распоряжением Совмина СССР после аварии на ЧАЭС для углубления фундаментальных исследований в



области обеспечения радиационной безопасности), решения, принятые Правительством СССР в первое после аварии время, были весьма эффективны. Оценив уровень угроз от радиационного загрязнения окружающей среды, на следующий после аварии день были приняты меры по эвакуации жителей из районов, непосредственно примыкающих к ЧАЭС, а позднее из всей 30-километровой зоны (в том числе г. Припять). В кратчайшие сроки была обеспечена ядерная и радиационная безопасность на аварийном реакторе, сооружены бетонная охлаждающая защита, «стена в грунте», препятствующая миграции радионуклидов с подземными водами, «Саркофаг» над аварийным блоком. Для интенсификации дезактивационных работ в 30-километровую зону было введено большое количество военнослужащих. Была проведена йодная профилактика и санитарная обработка жителей, а также ограничено потребление местных продуктов питания. В результате, стоимость единицы предотвращенной дозы при эвакуации населения из 30-километровой зоны варьировалась от 1 до 15 тыс. долл. США/чел.-Зв (с учетом приведения денежной массы с 1986 на 2012 год) в зависимости от загрязненности населенного пункта. Затраты на санитарную обработку жителей были также достаточно эффективными, стоимость единицы предотвращенной дозы оценивалась приблизительно 500 долл. США/чел.-Зв без учета затрат на выдачу новой одежды. Ограничение на потребление загрязненных продуктов питания позволило значительно сократить внутреннюю дозу облучения населения. Например, отказ от потребления молока снизил уровень доз на щитовидную железу до 12 раз (таблица 3.1), а стоимость единицы предотвращенной дозы от этой меры составляла около 3 тыс. долл. США/чел.-Зв [29].

Таблица 3.1

Снижение доз на щитовидную железу при отказе от потребления молока в различные сроки после загрязнения [29]

Время после загрязнения, сутки	1	2	3	4	6	10	15
Кратность снижения доз	12	6	4	2,9	2,0	1,4	1,2

Тем не менее, критике специалистов подвергаются решения, принятые на более поздних после аварии этапах. Во-первых, в некоторых отдаленных от аварии районах, например в Киевской области, мера йодной профилактики принималась слишком поздно (данная мера очень эффективная в первые 10 дней после аварии, однако решение о ее проведении было принято позднее из-за нерешительности местных органов власти). Во-вторых, практически не использовалась защитная мера укрытия населения (за исключением отмены занятий физическими упражнениями на открытом воздухе в г. Припяты). Предполагается, что эта мера могла бы снизить коллективную дозу облучения приблизительно на 100 чел-Зв [29].

В-третьих, основной критике подвергается решение правительств Украины и Белоруссии о позднем переселении (принятые позднее 1990 года) жителей из загрязненных поселений. Национальной комиссией по радиационной защите СССР была принята 35-бэрная концепция, согласно которой уровень допустимого дополнительного облучения в результате аварии на ЧАЭС за всю жизнь ограничивается величиной 350-500 мЗв. Данная концепция оценивалась со стороны международных организаций как весьма жесткая и побуждающая к излишним переселениям, однако, ввиду специфической политической ситуации в то время, была воспринята со стороны правительств Украины и Белоруссии негативно (как направленная на геноцид этих народов). В качестве критерия отселения была принята доза дополнительного облучения 5 мЗв/год. Согласно данному критерию в период 1990-1991 гг. фактически из загрязненных регионов было переселено 52,2 тыс. человек. Стоимость единицы предотвращенной дозы при позднем переселении оказалась чрезвычайно высокой, свыше 130000 долл. США/чел.-Зв [29].

Совокупные оценки научной обоснованности решений, принятых при ликвидации последствий аварии на ЧАЭС представлены в таблице 3.2. По этому поводу специалистами ИБРАЭ РАН отмечается, что отсутствие детальных схем устранения последствий радиационных аварий, а также методов обоснования решений в СССР привело к тому, что реализуемые решения зачастую

оказывались неэффективными, а последствия аварии не преодолены в полной мере до настоящего времени [29].

Таблица 3.2

Оценки научно-технического обоснования решений по защите населения [29]

Дата	Решение по защитным мерам	Обосновано/ не обосновано	Затронутое население (тыс. жителей)
26.04.86	Ограничение доступа к АЭС	Да	
26.04.86	Йодная профилактика населения г. Припять	Да	32
27.04.86	Эвакуация населения г. Припять	Да	46
01.05.86	Эвакуация населения 30-километровой зоны	Да	115
02.05.86	Решение по йодной профилактике	Нет	0
05.05.86	Решение по йодной профилактике	Нет	400
06.05.86	Ограничение на содержание I-131 в продуктах питания	Да	3000
10.05.86	Решение о вывозе детей из г. Киев	Нет	1000
12.05.86	Определение предела годовой дозы (100 мЗв)	Да	270
15.05.86	Зонирование территории по мощности дозы (1, 3, 5, 20 мР/час)	Да	<100
16.05.86	Ограничение на содержание радиоактивности в продуктах питания	Да	
29.05.86	Решение ЦК КПСС и СМ СССР о проведении дезактивационных работ в районах Украинской ССР и Белорусской ССР, подвергшихся радиоактивному загрязнению	Нет	250
30.05.86	Мощность дозы и содержание радиоактивных веществ в продуктах питания	Да	200
30.05.86	Рекомендации по защитным мерам в агропромышленном комплексе	Да	
22.08.86	Определение так называемой зоны жесткого контроля (ЗЖК) по содержанию Cs-137 в почве (15 Ки/км <sup>2</sup> )	Да	240
23.04.87	Предел годовой дозы на второй год после аварии (30 мЗв)	Да	<100
12.08.87	Расширение ЗЖК, в том числе с учетом социальных факторов	Нет	240+40
15.12.87	Ограничение на содержание Cs-134 и Cs-137 в продуктах питания	Да	
23.05.88	Cs-134 и Cs-137 в почве и продукции	Да	
18.07.88	Предел годовой дозы на третий год после аварии (25 мЗв)	Да	<100

Таблица 3.2 (продолжение)

13.09.88	Расширение ЗЖК	Нет	280+6,0
06.10.88	Ограничение на содержание Cs-134 и Cs-137 в продуктах питания	Да	
22.11.88	Принятие НКРЗ концепции ограничения дополнительной дозы за жизнь величиной в 350 мЗв	Да	
24.05.89 и 05.10.89	Переселение по критерию дозы за жизнь	Да	5,8
30.12.89	Расширение ЗЖК	Нет	
26.01.90	Льготы за повышенное содержание Cs в молоке	Нет	200
16.03.90	Переселение по критерию дозы за жизнь	Да	2,3
28.09.90	Зонирование по Cs-137 в почве (1, 5, 10, 15, 30 Ки/км <sup>2</sup> )	Нет	260
11.03.91	Расширение перечня населенных пунктов с льготами за повышенное содержание Cs в молоке	Нет	
19.02.91	Рекомендации по защитным мерам в агропромышленном комплексе	Да	
08.04.91	Ограничение на дозу дополнительного облучения 1 и 5 мЗв/год	Да	
15.05.91	Критерии для зонирования (Cs в почве и ПГД) и льготы	Нет	
28.12.91	Зонирование загрязненных территорий России в соответствии с законом	Нет	2,3 млн

Опыт устранения последствий аварии на ЧАЭС показал, что долговременное управление представляет собой масштабную задачу. Разработка стратегии устранения последствий радиационной аварии на заселенных территориях должна осуществляться с учетом большого количества факторов, таких как влияние на здоровье жителей, окружающую среду, экономического, социального, культурного, этического, политического и других. На основании этого опыта европейскими научными сообществами было разработано в рамках интегрированного проекта EURANOS (Европейский подход к управлению радиологическими чрезвычайными ситуациями и стратегиями реабилитации, контракт № FI6R-CT-2004-508843) руководство по управлению реабилитацией заселенных территории, загрязнённых вследствие радиационных аварий.

Согласно этому документу в целом структуру управления последствиями можно классифицировать на 5 основных этапов [93,94,102].

**1 Этап.** Определение типа инцидента и состава задействованных радионуклидов, а также масштабов распространения загрязнения. На этом этапе предполагается, построение прогнозных моделей распространения радионуклидов в зависимости от высоты выброса, розы ветров и погодных условий. Радионуклиды классифицируются в соответствии с видом излучения (гамма, бета или альфа) и с их периодом полураспада (долгоживущие и короткоживущие). В зависимости от различных сочетаний радионуклидов на практике оцениваются ожидаемые дозы облучения, степени угрозы для населения и определяются дальнейшие меры вмешательства на территории.

Таблица 3.3

Описание типов поверхностей на заселённых территориях [102]

<b>Поверхность</b>	<b>Описание поверхности</b>
Здания – внешние поверхности	Внешние твердые поверхности, включая стены, крыши, окна и двери зданий.
Здания – внутренние поверхности и объекты	Внутренние поверхности зданий, включая стены, потолки, мебель.
Здания – объекты высокой ценности	Объекты, которые не могут быть утилизированы и для которых использование стандартных методов дезактивации может привести к непоправимому ущербу, включая музейные экспонаты, гобелены, оригиналы документов и личные вещи.
Здания – специальные поверхности	Металлические, пластиковые поверхности и поверхности с покрытием в промышленных/коммерческих зданиях. Также включает системы вентиляции.
Дороги и вымощенные участки	Все дороги, тротуары, крупные мощенные или асфальтированные территории, такие как спортплощадки, дворы и автостоянки.
Почва, газоны и растения	Включает газоны, цветники, огороды, прилежащие к жилым, коммерческим и общественным зданиям, участкам, паркам, спортплощадкам и прочим благоустроенным "зеленым зонам".
Деревья и кустарники	Включает все древесные растения, такие как деревья, кусты и живые изгороди, прилежащие к жилым, коммерческим и общественным зданиям, участкам, паркам, спортплощадкам и прочим благоустроенным "зеленым зонам".

**2 Этап.** Разделение загрязненных территории на зоны по принципу срочности принятия решений (факторы, влияющие на приоритеты, представлены в приложении 3.1). В свою очередь заселенная территория классифицируется на

типы поверхностей, представленных в таблица 3.3. Согласно данным работы [96] каждый тип поверхности вносит свой вклад при формировании дозы облучения населения в различные периоды после аварии (таблица 3.4), что следует учитывать при проведении дезактивационных работ.

Таблица 3.4

Ожидаемые значения вкладов различных поверхностей в формирование дозы для человека, живущего в жилой зоне за различные периоды времени при загрязнении  $^{137}\text{Cs}$  (в процентах)<sup>a</sup> [96]

Процентное соотношение для периода	Крыши	Стены <sup>b</sup>	Дороги и вымощенные участки	и Деревья <sup>b</sup>	Трава и почва
7 дней	3 - 10	0 - 3	10 - 50	0 - 35	30 - 70
3 года	3 - 12	0 - 4	8 - 35	0 - 20	30 - 75
70 лет	4 - 20	0 - 6	5 - 25	0 - 15	35 - 80

а) Подразумевается, что жилая зона состоит из различных типов зданий, включая отдельные деревянные дома и многоэтажные здания, при этом все здания окружены садами

б) Долговременное облучение от стен и деревьев скорее всего будет пренебрежимо мало в случае, если осаждение происходит при дожде

**3 Этап.** Выбор приоритетных зон. Разработка и реализации стратегии мониторинга. Маловероятно, что лица, принимающие решения, будут обладать полной картиной распределения радиоактивных выпадений на начальных после аварии этапах. Поскольку решения должны быть основаны на как можно более четкой картине загрязнения и соответствующей дозовой нагрузке на население, требуется реализация подробной стратегии мониторинга, как для населения, так и для окружающей среды [125]. В стратегии мониторинга должны определяться приоритеты мониторинга, а также виды и объем производимых измерений. Существует ряд ключевых требований к типам и объему выполняемых мероприятий по мониторингу:

- Демонстрация того, что в результате инцидента не произошло загрязнения;
- Демонстрация того, что не требуется контрмер;
- Исследование возможности отмены противоаварийных контрмер;

- Определение доз облучения людей (индивидуальный мониторинг);
- Для поддержки защитных стратегии: определение районов, где требуется дезактивация, демонстрация того, что принятые меры достигли своих результатов;
- Обеспечение долговременного успокоения [102].

**4 Этап.** Рассмотрение вариантов защитных мер для каждой из зон. Отметим, что решение отказаться от проведения каких-либо рискоснижающих для населения мероприятий также является полноправным выбором стратегии; однако в случае, если выбрана такая стратегия, она обязательно должна сопровождаться мониторингом радиационной обстановки. Данный вариант следует рассматривать при ожидаемых небольших потенциальных дозах облучения для населения. При этом в руководстве не приводятся суждений относительно того, какой уровень риска может считаться низким. Согласно рекомендациям МКРЗ, данную меру следует использовать вплоть до ожидаемых доз облучения населения 20 мЗв/год. Отказ от применения защитных мер в данных диапазонах доз, на наш взгляд, является очень эффективным, ввиду того, что жители, проживающие на территории, не будут воспринимать инцидент как серьезную аварию и сохранят психологическое спокойствие, потери которого может иметь более негативные последствия, нежели радиационное воздействие.

В качестве основных мер вмешательства при радиационных загрязнениях на практике, как правило, рассматривают следующие виды: первичные меры вмешательства (укрытие населения в помещениях, лекарственную (йодную) профилактику, снабжение населения чистыми продуктами питания и водой, защиту органов дыхания респираторами, влажную уборку жилых помещений, укрытие ценных вещей, меры «самопомощи» и многие другие), дезактивацию территории, временную эвакуацию населения и постоянное отселение жителей с полной консервацией территории. Общее руководство касательно применения этих мер представлено в виде дерева решений в приложении 3.1 (рисунки П.3.1-П.3.3) [102].

**5 Этап.** Реализовать выбранный вариант. Контролировать эффективность выбранных мер.

При организации радиационной безопасности в аварийных ситуациях МКРЗ рекомендует использовать двухуровневый подход нормирования: если облучение ниже 20 мЗв/год – вмешательство экономически неоправданно, если облучение выше 100 мЗв/год – вмешательство обязательно, в остальных случаях решение может быть получено в соответствии с различными методами обоснования его эффективности. В современной научной литературе в целом изложены общие принципы расчета этой эффективности для мер вмешательства. На их основе в следующем разделе автором были сформированы аналитические выражения для определения дозовых границ эффективного использования различных мероприятий радиационной безопасности, которые были апробированы на гипотетическом сценарии радиационного загрязнения на территории России.

### **3.2 Статистические методы оценки эффективности защитных мероприятий**

В рамках данного раздела рассматриваются особенности использования принципа эффективности (1.23) для таких рискоснижающих мероприятий как дезактивация, эвакуация населения, полная консервация территории, а также повышение качества медицинского обслуживания ликвидаторов радиационных аварий. Как было отмечено выше, мероприятие является эффективным лишь в определенных границах доз. Обоснование этих границ для защитных мер на национальном уровне, на наш взгляд, позволит обезопасить органы управления от принятия ошибочных решений в части обеспечения радиационной безопасности. По этому поводу в МАГАТЭ также отмечают, что принятие однозначных национальных уровней вмешательства значительно упростит процедуру управления радиационными рисками, в том числе при трансграничных последствиях радиационных аварий [109,138].

При оценке эффективности мероприятий радиационной безопасности используются понятие выгоды и издержек, которые напрямую связаны с предотвращенной защитной мерой дозой облучения (см. выражения (1.21) и



(1.22)). Отметим, что в выражении (1.22) для всех защитных мер используется функция  $D(t)$ , которая является монотонно убывающей [75], ввиду естественного снижения активности радиоактивного загрязнителя со временем, а также вертикальной и горизонтальной его миграции в окружающей среде. Исходя из «физики» процесса она имеет вид:

$$D(t) = D(0) \cdot 2^{-\frac{t}{T}} \cdot e^{-\mu t}, \quad (3.1)$$

где  $T$  – период полураспада радиоактивного загрязнителя (лет);  $\mu$  – коэффициент снижающий дозу облучения за счет миграции радионуклидов в окружающей среде (1/год).

Основными особенностями применения принципа (1.23) для различных мер вмешательства являются отличия при оценке структуры издержек и процедуры расчета остаточной после их реализации дозы облучения населения. Рассмотрим их более детально для каждой защитной меры.

### 3.2.1 Оценка эффективности дезактивации территории

Дезактивация территории – это процесс механической очистки радиоактивных веществ с поверхностей зданий, сооружений, техники, одежды и т. д. При реализации данной меры вмешательства без эвакуации населения, фактическая доза его облучения будет пропорционально снижаться до момента ее завершения. Функцию  $D_R(t)$  можно представить в следующем виде:

$$D_R(t) = \begin{cases} D(0) \cdot 2^{-\frac{t}{T}} \cdot e^{-\mu t} \cdot \left(1 - \frac{f-1}{f} \cdot \frac{t}{t_0}\right), & \text{для } t \leq t_0 \\ D(0) \cdot 2^{-\frac{t}{T}} \cdot e^{-\mu t} \cdot \left(1 - \frac{f-1}{f}\right), & \text{для } t > t_0 \end{cases}, \quad (3.2)$$

где  $t_0$  – время проведения работ по дезактивации территории (лет);  $f$  – кратность снижения уровня доз по окончанию работ по дезактивации территории,  $f = D(t_0)/D_R(t_0)$ .

На рисунке 3.1 графически представлен расчет уровня предотвращенной дозы облучения для дезактивации территории.

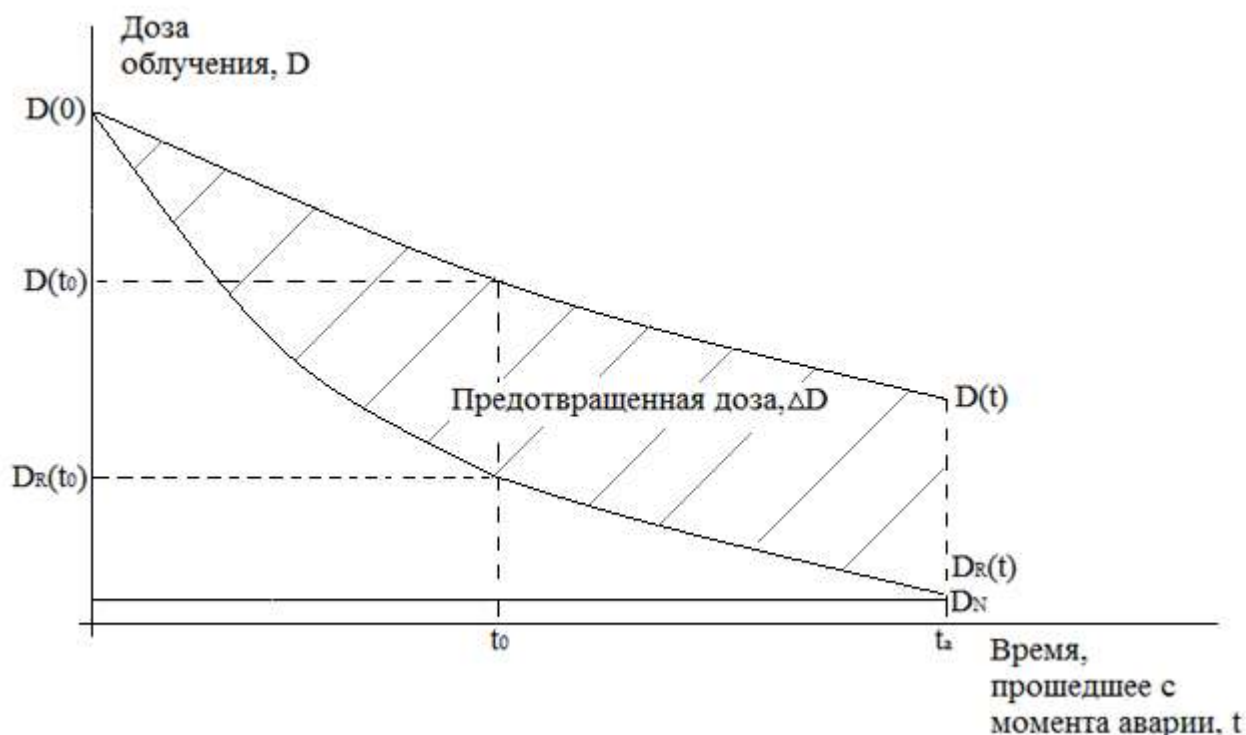


Рис. 3.1 Графическое представление оценки средней предотвращенной индивидуальной дозы облучения при дезактивации территории.

Издержки от дезактивации территории, согласно предположениям работ [89,95], в общем виде следует записывать следующим образом:

$$Q^- = c_{f_0} \cdot \log_{f_0} f + L_0, \quad (3.3)$$

где  $c_{f_0}$  – совокупные затраты на дезактивацию территории кратностью  $f=f_0$ .

Компонента  $c_{f_0}$  состоит из следующих статей затрат:

1. Затраты на чистку всех поверхностей ( $Z_1$ ):

$$Z_1 = c_{11}S_1 + c_{12}S_2 + c_{13}S_{n3}N + c_{14}S_{n4}N + c_{15}S_5 + c_{16}S_6 + c_{17}S_7, \quad (3.4)$$

где  $c_{11}$  – затраты на дезактивацию 1 м<sup>2</sup> крыш зданий (жилых и нежилых) (руб./м<sup>2</sup>),  $c_{12}$  – затраты на дезактивацию 1 м<sup>2</sup> фасадов зданий (жилых и нежилых) (руб./м<sup>2</sup>),  $c_{13}$  – затраты на дезактивацию 1 м<sup>2</sup> жилых помещений (руб./м<sup>2</sup>),  $c_{14}$  – затраты на дезактивацию 1 м<sup>2</sup> нежилых помещений (руб./м<sup>2</sup>),  $c_{15}$  – затраты на дезактивацию 1 м<sup>2</sup> дорог и тротуаров (руб./м<sup>2</sup>),  $c_{16}$  – затраты на дезактивацию 1 м<sup>2</sup> лесопарковой зоны (руб./м<sup>2</sup>),  $c_{17}$  – затраты на чистку остальных поверхностей (руб./м<sup>2</sup>);  $S_1$  – суммарная площадь, занимаемая зданиями (м<sup>2</sup>),  $S_2$  – суммарная площадь фасадов

зданий ( $m^2$ ),  $S_{n3}$  – среднедушевая площадь жилых помещений ( $m^2/\text{чел.}$ ),  $S_{n4}$  – среднедушевая площадь нежилых помещений ( $m^2/\text{чел.}$ ),  $S_5$  – суммарная площадь дорог и тротуаров ( $m^2$ ),  $S_6$  – суммарная площадь лесопарковых зон,  $S_7$  – площадь остальных поверхностей территории города и его окрестностей.

2. Затраты на сбор, транспортировку и обработку мусора, возникающего при очистке поверхностей ( $Z_2$ ):

$$Z_2 = c_{21}\rho m + c_{22}(1 - \rho)m + c_{23}V, \quad (3.5)$$

где  $c_{21}$  – затраты на сбор, транспортировку и размещение 1 кг твердого, «безопасного» мусора на свалке (руб./кг),  $c_{22}$  – затраты на сбор, транспортировку, обработку и хранение твердого, «опасного» мусора (руб./кг),  $c_{23}$  – затраты на сбор, транспортировку и фильтрацию 1  $m^3$  жидких отходов (руб./ $m^3$ ),  $\rho$  – доля «безопасных» твердых отходов,  $m$  – общая масса твердого мусора (кг),  $V$  – общий объем жидких отходов ( $m^3$ ).

3. Затраты на  $l$ -разовую санобработку автотранспорта и  $n$ -разовую санобработку людей ( $Z_3$ ):

$$Z_3 = c_{31}l\chi N + c_{32}nN, \quad (3.6)$$

где  $c_{31}$  – затраты на разовую санобработку 1 машины (руб./ед.),  $\chi$  – количество автомобилей, приходящихся на 1 жителя (ед./чел.),  $c_{32}$  – затраты на разовую санобработку 1 жителя.

$L_0$  – экономический эквивалент потерь здоровья ликвидаторов, обусловленные радиационным облучением при проведении работ по дезактивации территории,

$$L_0 = VE \cdot N_{лик} \cdot \int_0^{t_0} D_R(t) dt, \quad (3.7)$$

где  $N_{лик}$  – число ликвидаторов, участвующих в дезактивации.

Подставив выражения (1.21) и (3.3) в (1.23), получим, что дезактивацию территории кратностью  $f$  можно считать экономически обоснованной, если при ее реализации размер предотвращенной дозы удовлетворяет следующему неравенству:

$$\Delta D \geq \frac{c_{f_0} \cdot \log_{f_0} f + L_0}{VE \cdot N}. \quad (3.8)$$

Выражение (1.22) для оценки предотвращенной дозы при дезактивации территории  $\Delta D$  с учетом выражений (3.1) и (3.2) можно преобразовать следующим образом:

$$\Delta D = D(0) \cdot \frac{f-1}{f} \cdot \left( \int_0^{t_0} 2^{\frac{t}{T}} \cdot e^{-\mu t} \cdot \frac{t}{t_0} dt + \int_{t_0}^{t_a} 2^{\frac{t}{T}} \cdot e^{-\mu t} dt \right),$$

$$\text{где } \int_0^{t_0} 2^{\frac{t}{T}} \cdot e^{-\mu t} \cdot \frac{t}{t_0} dt + \int_{t_0}^{t_a} 2^{\frac{t}{T}} \cdot e^{-\mu t} dt = \frac{1 - e^{-\left(\frac{\ln 2}{T} + \mu\right)t_0} - t_0 \left(\frac{\ln 2}{T} + \mu\right) \cdot e^{-\left(\frac{\ln 2}{T} + \mu\right)t_0}}{t_0 \cdot \left(\frac{\ln 2}{T} + \mu\right)^2} = k_0.$$

Так как  $f > 1$  (ввиду того, что  $D(t_0) > D_R(t_0)$ ) и  $k_0 > 0$  (так как подынтегральные функции принимают положительные значения при любых  $t > 0$ ), то выражение (3.8) можно записать в следующем виде:

$$D(0) \geq \frac{(c_{f_0} \cdot \log_{f_0} f + L_0)}{VE \cdot N \cdot k_0} \cdot \frac{f}{f-1}. \quad (3.9)$$

В результате, дезактивацию загрязненной территории кратностью  $f$  следует считать экономически обоснованной, если индивидуальные дозы облучения жителей в регионе в начальный момент времени после аварии (или после достижения радиоактивного облака до города)  $D(0)$  удовлетворяют неравенству (3.9).

На основе предложенного метода рассчитаны дозовые границы эффективного использования дезактивации на территории России. В основе расчетов закладывается сценарий загрязнения крупного промышленного города, численностью приблизительно 200 тыс. человек, радиоактивными изотопами, преимущественно Цезием-137 (долгоживущий радионуклид, период полураспада около 30 лет, гамма-излучение), вследствие аварии на расположенном вблизи источнике ионизирующего излучения. Выбор данного радионуклида в качестве основного обуславливается тем, что при выгорании топлива в реакторе АЭС он накапливается в большом количестве и при попадании в окружающую среду

обладает высокой подвижностью. В долгосрочной перспективе Цезий-137 оказал практически 100-процентный вклад в формирование дозы облучения жителей за пределами 30-километровой зоны вследствие аварии на Чернобыльской АЭС [3,65]. Все исходные статистические данные, используемые в расчетах, подробно представлены в приложении 3.2.

При расчетах предполагается, что облучение всей группы людей в аварийной зоне является равномерным. Рассмотрим два вида дезактивации территории: первый – полная очистка территории города без замены поверхностей, второй – полная очистка территории города с заменой поверхностей (крыш зданий, асфальта, почвы и т.д.).

Согласно информации, представленной в руководстве по управлению реабилитацией населенных пунктов, только за счет очистки территории, индивидуальную дозу облучения населения данного региона можно сократить до 50%, в зависимости от интенсивности очистительных работ [102].

Общая информация, необходимая для расчетов компонент затрат  $c_{f_0}$  для данного вида дезактивации, представлена в таблице П.3.1 (приложение 3). Общее количество рабочего времени, требуемого на проведение данного мероприятия, составляет приблизительно 4,3 млн. чел.-часов. В целом группа ликвидаторов из  $N_{лик} = 7500$  человек может провести полную чистку территории за 1 месяц ( $t_0 = 1$  месяц). По оценкам, общий объем мусора составит 58 тыс. тонн твердых отходов (из них приблизительно 5% «опасных»,  $\rho=0,05$ ) и 580 тыс. м<sup>3</sup> жидких отходов.

Совокупные затраты на дезактивацию территории кратностью  $f_0 = 1,43$ , рассчитанные с учетом выражений (3.4-3.6) представлены в таблице 3.5.

Потери, обусловленные причинением вреда здоровью ликвидаторов от радиационного воздействия, оцененные согласно выражению (3.7), например, при ожидаемой годовой дозе облучения 100 мЗв/год, приблизительно равны 0,27 млн. долл. США, (соответственно при меньших ожидаемых дозах облучения пропорционально меньше). Учитывая порядок сумм совокупных затрат на проведение дезактивации, величиной этих потерь в целом можно пренебречь.

Статьи затрат на полную чистку территории без замены поверхностей  
кратностью  $f_0=1,43$

Затраты на очистку всех поверхностей ( $Z_1$ ) (млн. долл. США)	161
Затраты на утилизацию мусора ( $Z_2$ ) (млн. долл. США)	19
Затраты на 3 разовую санобработку всех транспортных средств и 10 разовую санобработку жителей ( $Z_3$ ) (млн. долл. США.)	3,5
Совокупные затраты на проведение мероприятия (млн. долл. США.)	183,5

Согласно выражению (3.8) данную меру вмешательства можно считать эффективной, если предотвращенная ею доза  $\Delta D$  за период планирования ( $t_a=36$  лет), с учетом  $VE=5,2$  тыс. долл. США/чел.-Зв для хронического облучения населения (рассчитанный в разделе 2.5), будет превышать 211 мЗв. В свою очередь, средняя индивидуальная доза облучения в начальный момент времени в городе  $D(0)$  должна превышать 4,7 мкЗв/час (выражение (3.9)), или ожидаемая накопленная доза за первый год после аварии  $D_{1год}$  приблизительно 40 мЗв/год. Отметим, для сравнения, что средняя фоновая доза облучения в России от естественных источников составляет приблизительно 5-6 мЗв/год. Если ожидаемая накопленная индивидуальная доза облучения в первый год после аварии составит 40 мЗв/год, то после дезактивации территории она сократится до 28,6 мЗв/год.

Предположительно, только за счет механической очистки территории различной степени интенсивности можно добиться снижения индивидуальной дозы облучения кратностью до 2 раз. Критерии эффективности дезактивации при различных кратностях  $f$  представлены в таблице 3.6.

Таким образом, проводить даже самую незатратную дезактивацию территории крупного промышленного российского города экономически целесообразно, если ожидаемая индивидуальная годовая доза облучения жителей после радиационной аварии превышает 35 мЗв/год.

Для того чтобы добиться снижения дозы облучения кратностью более 2 раз помимо полной очистки территории необходимо также провести частичную или

полную замену поверхностей. Согласно данным института глобального климата и экологии, в первое время после выпадения радиоактивной пыли и осадков на поверхностях (глубиной до 5 см.) содержится 60-80% изотопов [27], а значит, замена этих поверхностей может привести к снижению индивидуальной дозы облучения до 5 раз. Для проведения дезактивации территории с заменой поверхностей кратностью  $f_0=3,33$  раз потребуется приблизительно 54 млн. чел.-часов рабочего времени (группа ликвидаторов из 20 тыс. человек выполнит данную работу за 3 месяца,  $t_0 = 3$  месяца). Общий объем мусора составит 400 тыс. тонн твердых отходов (из них приблизительно 10% «опасных»,  $\rho=0,1$ ) и 580 тыс. м<sup>3</sup> жидких отходов.

Совокупные затраты на реализацию данной меры вмешательства, рассчитанные с учетом выражений (3.4-3.6) представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.6

Критерии эффективности дезактивации (без замены поверхностей) при различных кратностях

Кратность дезактивации ( $f$ )	Совокупные затраты на дезактивацию ( $Q$ , выражение 3.6), млн. долл. США	Мера эффективна, если			Значение остаточной после дезактивации индивидуальной дозы облучения, если $D_{1год}$ равно значению в предыдущей колонке, мЗв/год	
		$\Delta D$ превышает, мЗв	$D(0)$ превышает, мкЗв/час	$D_{1год}$ превышает, мЗв/год	в 1 год после аварии	во 2 год после аварии
1,1	48,9	56	4,1	35	32,3	30,7
1,2	93,6	108	4,3	37	31,0	29,3
1,3	134,6	155	4,5	38	29,9	28,2
1,43	183,6	211	4,7	40	28,6	26,8
1,5	208,1	239	4,8	41	28,0	26,1
1,6	241,2	277	4,9	42	27,1	25,2
1,7	272,3	313	5,1	44	26,4	24,4
1,8	301,6	347	5,2	45	25,6	23,6
1,9	329,4	379	5,3	46	25,0	23,0
2	355,7	409	5,5	47	24,4	22,3

Статьи затрат на полную чистку территории с заменой поверхностей  
кратностью  $f_0=3,33$

Затраты на очистку и замену поверхностей ( $Z_1$ ) (млн. долл. США)	602
Затраты на утилизацию мусора ( $Z_2$ ) (млн. долл. США)	36
Затраты на 7 разовую санобработку всех транспортных средств и 30 разовую санобработку жителей ( $Z_3$ ) (млн. долл. США)	8,6
Потери, обусловленные причинением вреда здоровью ликвидаторов от радиационного воздействия ( $L_0$ ) (млн. долл. США)	1,5
Совокупные затраты на проведение мероприятия (млн. долл. США)	648,1

Критерии эффективности дезактивации различной кратности ( $f$  от 2,5 до 5) при частичной или полной замене поверхностей представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8

Критерии эффективности дезактивации (с заменой поверхностей) при различных кратностях

Кратность дезактивации ( $f$ )	Совокупные затраты на дезактивацию ( $Q$ , выражение 3.6), млн. долл. США	Мера эффективна, если			Значение остаточной после дезактивации индивидуальной дозы облучения, если $D_{1год}$ равно значению в предыдущей колонке, мЗв/год	
		$\Delta D$ превышает, мЗв	$D(0)$ превышает, мкЗв/час	$D_{1год}$ превышает, мЗв/год	в 1 год после аварии	во 2 год после аварии
2,5	485,4	558	6,3	54	26,8	20,4
3	582,0	669	6,8	58	25,7	18,4
3,33	648,1	733	7,1	60	25,2	17,2
3,5	663,6	763	7,2	62	25,0	16,8
4	734,4	845	7,6	65	24,4	15,5
4,5	796,8	917	7,9	68	23,9	14,4
5	852,6	981	8,3	71	23,6	13,5

Согласно выражению (3.7) дезактивацию территории с заменой поверхностей кратностью  $f_0=3,33$  можно считать эффективной, если предотвращенная этой мерой вмешательства доза  $\Delta D$  за период планирования ( $t_a=36$  лет) будет превышать 733 мЗв. В свою очередь, средняя индивидуальная



доза облучения в начальный момент времени в городе  $D(0)$  должна превышать 7,1 мкЗв/час (выражение (3.8)), а ожидаемая накопленная доза за первый год после аварии  $D_{1год}$  приблизительно 60 мЗв/год. Если ожидаемая накопленная индивидуальная доза облучения в первый год после аварии составит 60 мЗв/год, то после дезактивации территории с заменой поверхностей она сократится до 25,2 мЗв/год (а во второй год после аварии составит 17,2 мЗв/год).

В результате нижняя граница эффективного применения дезактивации территории крупного промышленного российского города зависит от интенсивности проводимых работ и варьируется в диапазоне от 35 мЗв/год при кратности снижения в 1,1 раза до 71 мЗв/год при кратности снижения в 5 раз.

### 3.2.2 Оценка эффективности временной эвакуации населения на период дезактивации территории

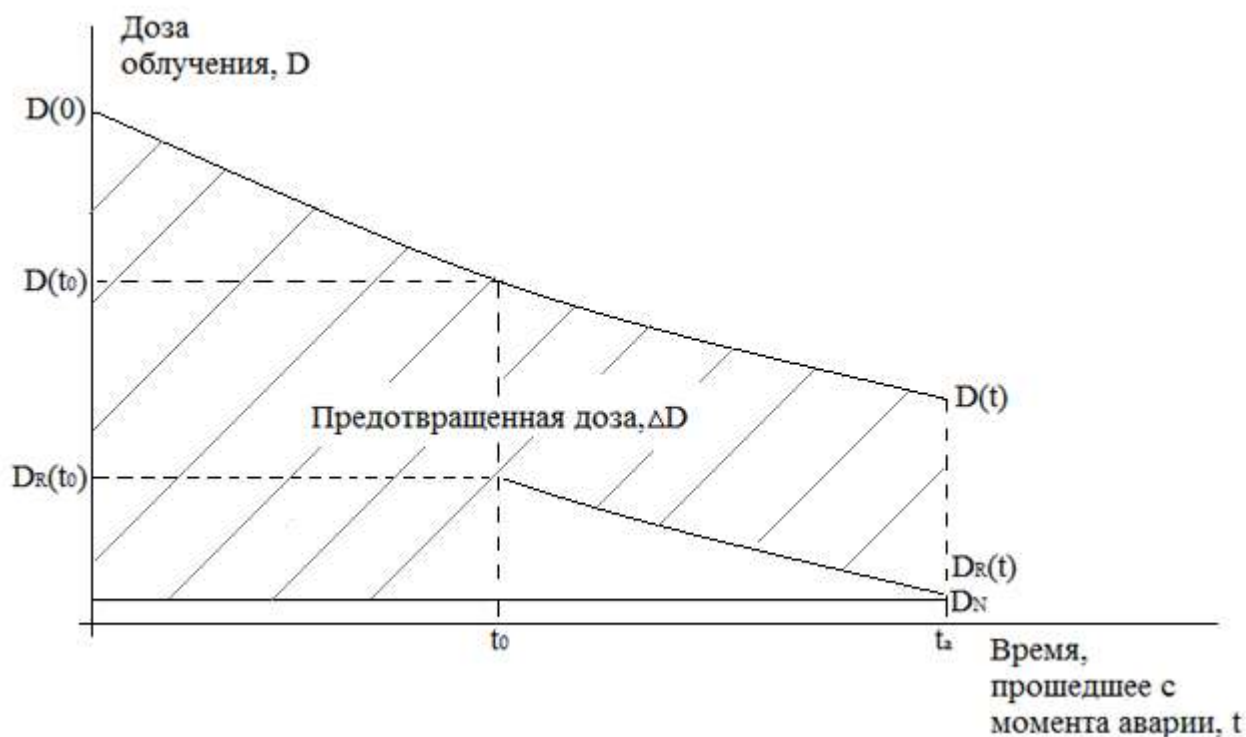


Рис. 3.2 Графическое представление оценки средней предотвращенной индивидуальной дозы облучения при временной эвакуации населения на период дезактивации территории.

Эвакуация населения – это комплекс мероприятий, который предполагает вывоз жителей из зон чрезвычайной ситуации и кратковременное их размещение в безопасных зонах. При реализации данной меры вмешательства, фактическая доза облучения населения будет равна естественному радиационному фону на момент эвакуации населения и остаточному после дезактивации радиационному уровню после возвращения жителей. Функцию  $D_R(t)$  можно записать следующим образом:

$$D_R(t) = \begin{cases} D_N, \text{ для } t \leq t_0 \\ D(0) \cdot 2^{-\frac{t}{T}} \cdot e^{-\mu t} \cdot \left(1 - \frac{f-1}{f}\right), \text{ для } t > t_0 \end{cases}, \quad (3.10)$$

где  $D_N$  – фоновая доза облучения в единицу времени в безопасных зонах (мкЗв/час).

На рисунке 3.2 графически представлен расчет уровня предотвращенной дозы облучения при эвакуации населения на период дезактивации территории.

Издержки при временной эвакуации населения на момент дезактивации, помимо затрат на саму дезактивацию, включают также затраты на вывоз населения в безопасную зону ( $Z_4$ ), его временное размещение и содержание в ней ( $Z_5$ ) и потери, связанные с остановкой производства в загрязненной зоне ( $L_1$ ):

$$Q^- = c_{f_0} \cdot \log_{f_0} f + Z_4 + Z_5 + L_0 + L_1, \quad (3.11)$$

где

$$Z_4 = c_{41} N, \quad (3.12)$$

$$Z_5 = c_{51} N t_0 \quad (3.13)$$

$$L_1 = BPII_{\partial} \cdot t_0, \quad (3.14)$$

$c_{41}$  – затраты на эвакуацию 1 жителя в безопасную зону (руб./чел.),  $c_{51}$  – затраты на размещение (предоставление жилого помещения) и содержание (питание, оказание медицинских услуг и т.д.) в единицу времени 1 эвакуированного жителя на момент эвакуации (руб./чел.-день),  $BPII_{\partial}$  – средний годовой валовый внутренний (региональный) продукт на душу населения.

Подставив выражения (1.21) и (3.11) в (1.23) получим, что временную эвакуацию населения в момент дезактивации кратностью  $f$  можно считать

экономически обоснованной, если при ее реализации размер предотвращенной дозы удовлетворяет следующему неравенству:

$$\Delta D \geq \frac{c_{f_0} \cdot \log_{f_0} f + Z_4 + Z_5 + L_0 + L_1}{VE \cdot N}. \quad (3.15)$$

Предотвращенную дозу при данной мере вмешательства  $\Delta D$  с учетом выражений (3.1) и (3.10) можно представить в виде:

$$\Delta D = D(0) \cdot \left( k_1 + \frac{f-1}{f} \cdot k_2 \right) - t_0 \cdot D_N,$$

где  $k_1 = \frac{1 - e^{-\left(\frac{\ln 2}{T} + \mu\right)t_0}}{\frac{\ln 2}{T} + \mu}, k_2 = \frac{e^{-\left(\frac{\ln 2}{T} + \mu\right)t_0} - e^{-\left(\frac{\ln 2}{T} + \mu\right)t_a}}{\frac{\ln 2}{T} + \mu}.$

Так как  $f > 1$  (ввиду того, что  $D(t_0) > D_R(t_0)$ ,  $k_1 > 0$  при  $t_0 > 0$ ,  $k_2 > 0$  при  $t_a > t_0$ ), то выражение (3.15) можно представить в следующем виде:

$$D(0) \geq \frac{c_{f_0} \cdot \log_{f_0} f + Z_4 + Z_5 + L_1 + t_0 \cdot D_N \cdot \lambda \cdot N}{VE \cdot N \cdot \left( k_1 + \frac{f-1}{f} \cdot k_2 \right)}. \quad (3.16)$$

В результате, временную эвакуацию жителей из загрязненной территории в период проведения работ по ее дезактивации кратностью  $f$  следует считать экономически обоснованной, если индивидуальные дозы облучения жителей в регионе в начальный момент времени после аварии (или после достижения радиоактивного облака до города)  $D(0)$  удовлетворяют неравенству (3.16).

Рассмотрим применение данного метода для расчета дозовой границы эффективного использования данной меры вмешательства при осуществлении описанного ранее сценария загрязнения. Издержки от осуществления временной эвакуации населения на момент дезактивации территории, с учетом данных из приложения 3.2 и выражений (3.11-3.14), представлены в таблице 3.9. При этом существенную долю издержек составят потери, связанные с остановкой производства. Согласно выражению (3.15) эвакуацию населения на момент дезактивации территории кратностью  $f_0=3,33$  можно считать экономически обоснованной, если предотвращенная этой мерой вмешательства индивидуальная

доза  $\Delta D$  за период планирования ( $t_a=36$  лет) превышает 1548 мЗв. В свою очередь, средняя индивидуальная доза облучения в начальный момент времени в городе  $D(0)$  должна превышать 14,6 мкЗв/час (выражение 3.19), или ожидаемая накопленная доза за первый год после аварии  $D_{1год}$  приблизительно 125 мЗв/год. Если ожидаемая накопленная индивидуальная доза облучения в первый год после аварии составит 125 мЗв/год, то после эвакуации населения она сократится до 28,3 мЗв/год.

Таблица 3.9

Издержки от осуществления временной эвакуации населения на момент дезактивации территории

Затраты на вывоз населения в безопасную зону ( $Z_4$ ), (млн. долл. США)	0,6
Затраты на временное размещение и содержание населения в безопасной зоне ( $Z_5$ ), (млн. долл. США)	60
Потери, связанные с остановкой производства ( $L_1$ ), (млн. долл. США)	648
Затраты на дезактивацию территории кратностью $f_0=3.33$ , (млн. долл. США)	637,2
Совокупные издержки, (млн. долл. США)	1345,8

Критерии эффективности эвакуации населения при различных кратностях дезактивации территории представлены в таблице 3.10. В результате эту меру вмешательства можно считать эффективной при ожидаемых в первый год после аварии дозах облучения более 125 мЗв/год. При этом остаточная доза облучения населения в среднем не превысит 30 мЗв/год за этот период, если проводить дезактивацию кратностью более 3 раз.

Оценка эффективности данной меры вмешательства также проведена для отдельных групп лиц, в частности для детей (до 18 лет), беременных и женщин детородного возраста (до 40 лет). В результате временную эвакуацию этих жителей на момент дезактивации территории кратностью  $f_0=3,33$  можно считать экономически обоснованной, если ожидаемая годовая индивидуальная доза превышает 64 мЗв/год (7,4 мкЗв/час в начальный момент времени) и 51 мЗв/год (5,9 мкЗв/час в начальный момент времени) соответственно. Временная эвакуация детей при более низких дозах облучения можно также обосновать тем, что они

практически влияют на производительность труда в регионе, и тем самым не увеличивают потери, связанные с остановкой производства.

Стоит отметить, что данные результаты получены для долгоживущего радионуклида Цезия-137. Если провести аналогичные расчеты для короткоживущего радионуклида, например, Йода-131 (период полураспада приблизительно 8 дней, гамма-излучение), который вносил наибольший вклад в формирование дозы облучения жителей в первый месяц после аварии на Чернобыльской АЭС, то решение о временной эвакуации населения длительностью 1 месяц является экономически обоснованным при ожидаемой дозе облучения от данного радионуклида более 45 мЗв (активность Йода-131 через один месяц после аварии практически сводится к 0). В данном случае чрезвычайно важным также является проведение с первых дней после аварии йодной профилактики на территории и предоставление населению респираторов для защиты органов дыхания от попадания радиоактивного йода внутрь организма.

Таблица 3.10

Критерии эффективности эвакуации населения при различных кратностях  
дезактивации территории

Кратность дезактивации ( <i>f</i> )	Совокупные затраты на дезактивацию ( <i>Q</i> , выражение 3.6), млн. долл. США	Мера эффективна, если			Значение остаточной после дезактивации индивидуальной дозы облучения, если $D_{1год}$ равно значению в предыдущей колонке, мЗв/год	
		$\Delta D$ превышает, мЗв	$D(0)$ превышает, мкЗв/час	$D_{1год}$ превышает, мЗв/год	в 1 год после аварии	во 2 год после аварии
2,1	1101,8	1267	15,9	136	49,3	62
2,5	1194,1	1374	15,1	129	39,3	48
3	1290,7	1485	14,7	126	31,3	40
3,33	1346,0	1548	14,6	125	28,3	36
3,5	1372,4	1579	14,6	125	27,3	34
4	1443,1	1660	14,7	126	23,3	30
4,5	1505,5	1732	14,8	126	21,3	27
5	1561,3	1796	14,9	128	19,3	24

### 3.2.3 Оценка эффективности постоянного отселения жителей с полной консервацией территории

Полная консервация территории предполагает эвакуацию населения из загрязненных зон с постоянным их размещением в безопасных зонах и полным запретом въезда на нее. При реализации данной меры вмешательства население будет подвержено естественному фоновому уровню облучения, характерным для безопасной зоны:

$$D_R(t) = D_N, \text{ для } t \geq 0. \quad (3.17)$$

Издержки при постоянном отселении с полной консервацией территории (С) включают:

1. Затраты на вывоз населения в безопасную зону ( $Z_4$ ).
2. Затраты на временное размещение и содержание населения до решения вопроса о его постоянном размещении ( $Z_5$ ).
3. Затраты на постоянное размещение жителей ( $Z_6$ ):

$$Z_6 = c_{61}N, \quad (3.18)$$

где  $c_{61}$  – затраты на предоставление постоянного жилья на 1 эвакуированного человека (руб./чел.).

4. Компенсационные выплаты эвакуированным жителям за потерю личного имущества ( $Z_7$ ):

$$Z_7 = c_{71}N, \quad (3.19)$$

где  $c_{71}$  – средняя стоимость утерянного личного имущества на 1 эвакуированного жителя (руб./чел.).

5. Потери, связанные с утратой основных фондов ( $L_2$ ):

$$L_2 = O\Phi_\delta N, \quad (3.20)$$

где  $O\Phi_\delta$  – стоимость основных фондов на душу населения в загрязненной зоне (руб./чел.).

6. Потери, связанные с выводом загрязненных земель из общего пользования ( $L_3$ ):

$$L_3 = \sum_i g_i S_i, \quad (3.21)$$

где  $g_i$  – стоимость 1 квадратного километра земли  $i$ -го типа (руб./км<sup>2</sup>),  $S_i$  – площадь земли  $i$ -го типа (км<sup>2</sup>).

Совокупные издержки для данной меры вмешательства оценивается как сумма затрат и потерь, определенных согласно выражениям (3.12), (3.13) и (3.18)-(3.21):

$$Q^- = C = Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7 + L_2 + L_3, \quad (3.22)$$

Подставив выражения (3.22) и (1.21) в (1.23), получим, что постоянное отселения жителей из загрязненной зоны с полной консервацией территории можно считать экономически обоснованной, если при ее реализации размер предотвращенной дозы удовлетворяет следующему неравенству:

$$\Delta D \geq \frac{Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7 + L_2 + L_3}{VE \cdot N}. \quad (3.23)$$

Предотвращенную дозу при данной мере вмешательства  $\Delta D$  с учетом выражения (3.17) можно представить в следующем виде:

$$\Delta D = D(0) \cdot k_3 - t_a \cdot D_N,$$

$$\text{где } k_3 = \frac{1 - e^{-\left(\frac{\ln 2}{T} + \mu\right)t_a}}{\frac{\ln 2}{T} + \mu}.$$

Так как  $k_3 > 0$  (при  $t_a > 0$ ), то выражение (3.23) можно привести к следующему виду:

$$D(0) \geq \frac{C + t_a \cdot D_N \cdot \lambda \cdot N}{VE \cdot N \cdot k_3}. \quad (3.24)$$

В результате, решение о постоянном отселении жителей и консервации территории экономически целесообразно, если в начальный момент времени средняя индивидуальная доза облучения  $D(0)$  удовлетворяет неравенству (3.4).

Рассмотрим применение данного метода для расчета дозовой границы эффективного использования данной меры вмешательства при осуществлении описанного ранее сценария загрязнения. Затраты и потери при постоянном отселении жителей с полной консервацией территории крупного промышленного города, рассчитанные на основе данных из приложения 3.2 с учетом выражений (3.12, 3.13, 3.18-3.22), представлены в таблице 3.11.

При постоянном переселении жителей в безопасную зону, основную долю издержек составляют затраты на постоянное размещение 196 тыс. жителей, а именно строительство жилых домов, создание инфраструктуры, новых рабочих мест и прочее. Согласно выражению (3.23) данную меру можно считать экономически обоснованной, если предотвращенная ею индивидуальная доза  $\Delta D$  за период планирования ( $t_a=36$  лет) превышает 3481 мЗв. В свою очередь, средняя индивидуальная доза облучения в начальный момент времени в городе  $D(0)$  должна превышать 23,5 мкЗв/час (выражение 3.24), а ожидаемая накопленная доза за первый год после аварии  $D_{1год}$  приблизительно 200 мЗв/год. Данная интенсивность облучения относится к острому типу, поэтому  $VE = 10,4$  тыс. долл. США/чел.-Зв. Если ожидаемая накопленная индивидуальная доза облучения в первый год после аварии составит 200 мЗв/год, то после переселения жителей она сократится до фонового уровня, который в России в среднем составляет 5-6 мЗв/год.

Стоит отметить, что совокупные издержки при консервации территории крупного промышленного города равны 6052,3 млн. долл. США являются весьма неточными. При более детальном анализе эта величина может оказаться значительно выше, что в результате должно увеличить нижнюю границу дозы эффективного применения данной защитной меры. В свою очередь, согласно результатам многих радиационно-эпидемиологических исследований (приведенных в главе 2), облучение 200 мЗв/год и более оказывает реальный статистически измеримый риск здоровью и жизни населения. Поэтому, на наш взгляд, граница 200 мЗв/год является весьма обоснованной для установления региону статуса «зоны отчуждения».



Затраты и потери при постоянном отселении жителей с полной консервацией  
территории крупного промышленного города

Затраты на вывоз населения в безопасную зону ( $Z_4$ ), (млн. долл. США)	0,6
Затраты на временное размещение и содержание населения в безопасной зоне ( $Z_5$ ), (млн. долл. США)	60
Затраты на постоянное размещение жителей ( $Z_6$ ), (млн. долл. США)	2817,2
Компенсационные выплаты эвакуированным жителям за потерю личного имущества ( $Z_7$ ), (млн. долл. США)	804,9
Потери, связанные с утратой основных фондов ( $L_2$ ), (млн. долл. США)	1984,1
Потери, связанные с выводом загрязненных земель из общего пользования ( $L_3$ ) (млн. долл. США)	385
Совокупные издержки, (млн. долл. США)	6052,3

### 3.2.4 Оценка эффективности повышения качества медицинского обслуживания ликвидаторов радиационных аварий

В состав основных мер вмешательств целесообразно также включить повышение качества медицинского обслуживания облученных, в частности периодическую диагностику онкологических заболеваний. На наш взгляд, данная мера может оказаться эффективной для ликвидаторов радиационных аварий, получивших острую дозу облучения [70]. Обоснованность этого предположения подтверждается данными онкологического центра им Н.Н. Блохина, согласно которым вероятность излечения от онкологического заболевания существенно зависят от стадии обнаружения болезни. По усредненной по всем видам ЗНО информации, среди онкологических больных, прошедших специальное лечение, на первой стадии излечивается 97%, на второй – 75%, на третьей стадии – 30%, четвертая стадия практически неизлечима [51].

Экономический эффект от улучшения качества медицинского обслуживания возникает из-за снижения среди облученных коэффициента смертности от раковых заболеваний, преимущественно от несмертельных видов,

описанных в разделе 2.3. В пересчете на одного индивидуума этот эффект можно оценить на основе следующего выражения:

$$Q^+ = VE \cdot \Delta LLE_{136}(Z) \cdot D, \quad (3.25)$$

где  $\Delta LLE_{136}(Z)$  – снижение ожидаемой потери чел.-лет жизни на 1 чел.-Зв облучения при увеличении ежегодных среднедушевых затрат на медицинское обслуживание (диагностику) до  $Z$  (чел.-лет/чел.-Зв),  $D$  – фактическая накопленная доза облучения индивидуума (Зв.). При этом  $\Delta LLE_{136}(Z)$  можно оценить следующим образом:

$$\Delta LLE_{136}(Z) = \left(1 - \frac{K(Z)}{K(Z_0)}\right) \cdot LLE_{136}^{несмерт}, \quad (3.26)$$

где  $K(Z)$  – коэффициент летальности от несмертельных видов раковых заболеваний и лейкемии (виды ЗНО, входящие во 2 и 3 кластер из раздела 2.3) при ежегодных среднедушевых затратах на диагностику онкологических заболеваний равных  $Z$ ,  $LLE_{136}^{несмерт}$  – ожидаемая потеря чел.-лет жизни индивидуума от несмертельных видов ЗНО и лейкемии на 1 Зв облучения,  $Z_0$  – уровень среднедушевых затрат на диагностику онкологических заболеваний до облучения (руб/год). Коэффициент летальности от несмертельных видов ЗНО можно представить в виде функции от затрат на диагностику с параметром  $\beta$  следующего вида:

$$K(Z) = \frac{1}{\beta \cdot Z + 1}. \quad (3.27)$$

Выражение (3.27) учитывает основные закономерности взаимосвязей в паре  $K$  и  $Z$ . При нулевых затратах ( $Z=0$ )  $K=1$ , при  $Z \rightarrow \infty$ ,  $K=0$ . При этом эффективность увеличения расходов на диагностику с ростом  $Z$  снижается.

Эффект  $Q^+$  достигается за счет увеличения ежегодных среднедушевых затрат на медицинское обслуживание (диагностику), которые можно разделить на две составляющие:

$$Q^- = C_1 + C_2, \quad (3.28)$$

где  $C_1$  – совокупное увеличение затрат на диагностику онкологических заболеваний ликвидаторов за период с момента облучения до ожидаемого

проявления онкологического заболевания, который, согласно исследованиям когорты выживших после атомной бомбардировки в Хиросиме и Нагасаки, в среднем примерно равен 20 годам;

$$C_1 = (Z - Z_0) \cdot \sum_{t=1}^{20} (1+d)^{-t}, \quad (3.29)$$

$d$  – коэффициент дисконтирования затрат, характеризующий снижение их стоимости в связи с удешевлением технологий со временем;  $C_2$  – совокупное увеличение среднелюдских затрат на диагностику онкологических заболеваний ликвидаторов, принятые с учетом снизившегося в первые 20 лет уровня смертности среди облученных, за последующие годы жизни:

$$C_2 = (Z \cdot (1 - K(Z)) - Z_0 \cdot (1 - K(Z_0))) \cdot \sum_{t=21}^{40} (1+d)^{-2t}. \quad (3.30)$$

В выражении (3.30) учтены эффекты снижения ценности лет жизни индивидуума и стоимости диагностики со временем, в предположении, что характеризующие эти эффекты дисконты равны между собой.

Подставив выражения (3.25) (с учетом (3.26) и (3.27)) и (3.28) в (1.23), получим, что повышение затрат на проведение ежегодной диагностики от онкозаболеваний среди облученных следует считать экономически обоснованным, если фактическая накопленная доза облучения индивидуума превышает следующее значение:

$$D \geq \frac{(C_1 + C_2) \cdot (\beta \cdot Z + 1)}{VE \cdot \beta \cdot (Z - Z_0) \cdot LLE_{136}^{несмерт}} \quad (3.31)$$

Оценим уровень радиационного облучения для ликвидаторов последствий радиационных аварий на территории России. Согласно данным Министерства здравоохранения и социального развития ежегодные среднелюдские затраты на оказание высокотехнологичной помощи (в том числе диагностики онкологических заболеваний) в России составляют приблизительно 16 долл. США на человека [78]. При этом согласно данным Московского научно-исследовательского онкологического института им. П. А. Герцена, коэффициент летальности среди несмертельных видов раковых заболеваний и лейкемии

(заболевания 2 и 3 кластеров в разделе 2.3) в России равен 0,47 среди мужчин и 0,4 среди женщин [23]. Подставляя значения  $Z_0 = 16$  долл. США и  $K(Z_0) = 0,47$  для мужчин и  $K(Z_0) = 0,4$  для женщин в выражение (3.27), получим коэффициент  $\beta = 0,07$  долл. США<sup>-1</sup> для мужчин и  $\beta = 0,094$  долл. США<sup>-1</sup> для женщин.

Ожидаемые потери чел.-лет жизни среднестатистических мужчины и женщины, проживающих в России, на 1 чел.-Зв. облучения, рассчитанных на основе моделей (2.4) и (2.6) для несмертельных видов раковых заболеваний (согласно кластеризации в разделе 2.3) и лейкемии, равны 0,488 и 0,852 чел.-лет./чел.-Зв. соответственно (таблица 2.21). С учетом представленных данных, на основе выражения (3.31) для коэффициента дисконтирования затрат  $d = 0,03$  год<sup>-1</sup>, рассчитаны критерии обоснованности повышения затрат на медицинское обслуживание облученных индивидуумов. Полученные результаты представлены в таблицах 3.12 и 3.13.

Эти результаты свидетельствуют об эффективности повышения ежегодных затрат на диспансеризацию и диагностику онкологических заболеваний среди ликвидаторов, получивших острую дозу эквивалентного облучения в диапазоне 100-200 мЗв и выше. Например, при облучении группы мужчин-ликвидаторов со средней индивидуальной острой дозой свыше 175 мЗв экономически обоснованным является повышение ежегодных среднедушевых затрат в этой группе на диагностику онкологических заболеваний до 94 долл. США. Согласно данным электронного ресурса [49,50] этих средств достаточно для прохождения облученными процедур по диагностике онкологических заболеваний в России 1-2 раза в год. При этом, согласно выражению (3.27), ожидаемое значение коэффициента летальности от несмертельных видов раковых заболеваний сократится до 0,1. Для женщин-ликвидаторов, доля которых, например, при ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС составляла приблизительно 3,5%, повышение затрат на медицинское обслуживание является еще более эффективной мерой. Аналогичное с мужчинами повышение ежегодных среднедушевых затрат на медицинское обслуживание женщин обосновывается при дозах в среднем на 35% меньших, чем у мужчин.

Таблица 3.12

Критерии эффективности повышения качества медицинского обслуживания для облученного среднестатистического мужчины, проживающего в России.

Повышение среднедушевых ежегодных затрат на диагностику онкологических заболеваний до значений	Эффективно при средней острой индивидуальной дозе свыше (мЗв)
62,7 долл. США	120
78,4 долл. США	160
94 долл. США	175
109,7 долл. США	200

Таблица 3.13

Критерии эффективности повышения качества медицинского обслуживания для облученной среднестатистической женщины, проживающей в России.

Повышение среднедушевых ежегодных затрат на диагностику онкологических заболеваний до значений	Эффективно при средней острой индивидуальной дозе свыше (мЗв)
62,7 долл. США	90
78,4 долл. США	110
94 долл. США	130
109,7 долл. США	150

### **3.3 Методологические подходы к оптимизации стратегии управления последствиями радиационных аварий с учетом оценок рисков**

Постановка задачи поиска оптимальной стратегии управления последствиями радиационных аварий сформирована на базе трех принципов, рекомендованных МКРЗ и описанных в приложении 1.2: принцип нормирования, принцип обоснования, принцип оптимизации. Дозовые границы, при которых соблюдается принцип обоснования (критерий эффективности) для различных рискоснижающих мероприятий на территории России, представлены в предыдущем разделе. Согласно современным рекомендациям при аварийных ситуациях, для выполнения принципа нормирования при организации радиационной безопасности, необходимо придерживаться дозовых ограничений по облучению населения, установленных местными органами управления.

Рекомендуемый МКРЗ двухуровневый подход нормирования описывался в разделе 3.1 [44,116].

В качестве основного критерия оптимизации при решении задачи поиска стратегии управления радиационной безопасностью МКРЗ предлагает рассматривать уровень остаточного после применения меры вмешательства уровня радиационного риска (критерий (1.28)). В этом случае математическая постановка задачи управления последствиями чрезвычайных ситуаций, можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}
 & REID(D_R | D(0), V) \rightarrow \min \\
 & \left\{ \begin{array}{l}
 Q^+(V | D(0)) - Q^-(V | D(0)) \geq 0 \\
 \int_0^{1200} D_R(t | D(0), V) dt \leq D_1^+ \\
 \int_{1200}^{2400} D_R(t | D(0), V) dt \leq D_2^+ \\
 \dots \\
 \int_{t_{\alpha-1}}^{t_{\alpha}} D_R(t | D(0), V) dt \leq D_{t_{\alpha}}^+,
 \end{array} \right. \quad (3.32)
 \end{aligned}$$

где  $REID(D_R/D(0), V)$  – уровень пожизненного радиационного риска для населения за период планирования  $t_{\alpha}$  лет после осуществления меры вмешательства  $V$ , при условии, что индивидуальная доза в начальный после аварии момент времени составляет  $D(0)$ ;  $Q^+(V|D(0))$  – стоимостная оценка положительного эффекта населению от осуществления меры вмешательства  $V$ , при условии, что индивидуальная доза в начальный после аварии момент времени составляет  $D(0)$ ;  $Q^-(V|D(0))$  – издержки от осуществления меры вмешательства  $V$  при условии, что индивидуальная доза в начальный после аварии момент времени составляет  $D(0)$ ;  $D_i^+$  – уровень годовой допустимой остаточной индивидуальной дозы, установленный регулирующим органом местной власти в  $i$ -ый после аварии год.

В качестве ограничений при решении задачи (3.32) использовались предельно допустимые дозы, установленные указаниями правительства СССР после происшествия в Чернобыле. После аварии на ЧАЭС была принята «35-бэрная» концепция, согласно которой дополнительное техногенное облучение

населения вследствие Чернобыльской аварии не должно превышать значения 350 мЗв за всю жизнь. При этом в первый, второй и третий после аварии годы индивидуальные дозы облучения населения не должны превышать 100, 30 и 25 мЗв/год соответственно. С учетом этой концепции, а также границ эффективного использования различных защитных мер, приведенных в разделе 3.2 для крупного промышленного города в России, в таблице 3.14 представлена оптимальная (согласно оптимизационной задаче (3.32)) стратегия управления последствиями радиационной аварии на подобных территориях при различных ожидаемых уровнях радиационного облучения.

Представленный в таблице 3.14 комплекс мер вмешательств позволяет обеспечить весьма низкие уровни облучения населения. Остаточная пожизненная доза не будет превышать 550 мЗв при любых сценариях развития аварии. Если принять среднюю дозу облучения населения в России от естественных источников приблизительно равным 270 мЗв за всю жизнь, то уровень техногенного облучения вследствие аварии составит 280 мЗв, что соответствует «35-бэрной» концепции. При реализации предложенной стратегии рассчитанная согласно авторским моделям вероятность пожизненной радиационно-обусловленной смерти населения от источников техногенного облучения не превысит  $6,5 \cdot 10^{-3}$  или в среднем за год  $1,8 \cdot 10^{-4}$ .

Соотношение выгод и издержек от рискоснижающих мероприятий, используемых в стратегии, при любых ожидаемых дозах облучения населения составит 0 долл. США, средняя стоимость предотвращенной дозы не превысит 5200 долл. США/чел.-Зв для мер дезактивации и эвакуации населения и 10400 долл. США/чел.-Зв для полной консервации территории. Полученные значения удовлетворяют соотношениям (1.23) и (1.24), что свидетельствует об эффективности мероприятий радиационной безопасности.

Стоит также отметить, что согласно результатам, полученным в разделе 3.2, временная эвакуация детей, а также женщин детородного возраста и беременных при ожидаемых годовых значениях доз более 60 мЗв/год (например, в детские лагеря, как это было сделано после Чернобыльской аварии [29]) экономически

обоснована и является также оптимальной мерой управления с точки зрения оптимизационной задачи (3.32) для этих групп лиц.

Рассмотрим в качестве основного критерия оптимизации соотношение пользы и издержек от защитных мер. В этом случае постановка задачи поиска оптимальной по эффективности стратегии примет следующий вид:

$$\begin{cases}
 Q^+(V | D(0)) - Q^-(V | D(0)) \rightarrow \max \\
 Q^+(V | D(0)) - Q^-(V | D(0)) \geq 0 \\
 \int_0^{1200} D_R(t | D(0), V) dt \leq D_1^+ \\
 \int_0^{2200} D_R(t | D(0), V) dt \leq D_2^+ \\
 \dots \\
 \int_{t_{\alpha}-1}^{t_{\alpha}} D_R(t | D(0), V) dt \leq D_{t_{\alpha}}^+,
 \end{cases} \quad (3.33)$$

В таблице 3.15 представлена оптимальная (согласно оптимизационной задаче (3.33)) стратегия управления последствиями радиационной аварии в крупном промышленном российском городе. Остаточная пожизненная доза не будет превышать 620 мЗв при любых сценариях развития аварии. С учетом дозы, получаемой от естественных источников, уровень техногенного облучения вследствие аварии составит 350 мЗв, что соответствует «35-бэрной» концепции. При реализации предложенной стратегии рассчитанная согласно авторским моделям вероятность пожизненной радиационно-обусловленной смерти населения от источников техногенного облучения не превысит  $7,5 \cdot 10^{-3}$  или в среднем за год  $2,1 \cdot 10^{-4}$ .

Соотношение выгод и издержек от рискоснижающих мероприятий, используемых в стратегии, при любых ожидаемых дозах облучения населения варьируется от 0 до 1300 млн. долл. США, средняя стоимость предотвращенной дозы находится в диапазоне от 2400 до 5200 долл. США/чел.-Зв для мер дезактивации и эвакуации населения и равна 10400 долл. США/чел.-Зв для полной консервации территории. Таким образом, предложенная стратегия



является более рискованной, по сравнению с предыдущей, но более эффективной с экономической точки зрения.

В результате, опираясь на предложенные в диссертационном исследовании методы оценок радиационных рисков и показателей эффективности рискоснижающих мероприятий можно сформировать несколько обоснованных со всех точек зрения стратегий по обеспечению радиационной безопасности на территориях, подверженных радиационному загрязнению. При этом выбор оптимальной из них может осуществляться на усмотрение местных органов управления, с учетом местных условий, включая размер бюджета и экономической значимости региона.

Учитывая результаты оптимизации, представленные в таблицах 3.14 и 3.15, можно сделать вывод, что на территории России обоснованным является установление допустимых остаточных доз облучения населения в первый год после радиационной аварии на уровне 35-40 мЗв/год. Эти результаты уточняют двухуровневый подход нормирования радиационной безопасности, предложенный МКРЗ. Таким образом, при любых развитиях аварии местные органы управления не должны допустить в краткосрочной перспективе уровни облучения населения, превышающие границы 35-40 мЗв/год, а в долгосрочной сократить их до допустимых для проживания значений, установленных нормативами радиационной безопасности России.

Отметим, что согласно выражениям (3.9), (3.16), (3.24) и (3.31) значения нижней дозовой границы эффективного использования мероприятий радиационной безопасности обратно пропорциональны стоимостному эквиваленту ущерба здоровью населения от радиации  $VE$ . В связи с этим предложенный статистический подход позволяет обосновывать применение защитных мероприятий в экономически развитых странах с высоким ресурсным потенциалом при более низких ожидаемых дозах облучения и принимать более жесткие нормативные значения по допустимой остаточной дозе облучения населения.

Таблица 3.14

Параметры оптимальной стратегии управления радиационной безопасностью крупного промышленного российского города, соответствующие задаче (3.32)

Доза облучения в начальный момент времени, мкЗв/час	Ожидаемая доза облучения в первый год после аварии, мЗв/год	Оптимальная стратегия управления	Остаточная пожизненная доза облучения (от естественных и техногенных источников), мЗв	Остаточная доза облучения в первый год после аварии, мЗв/год	Показатели эффективности мероприятий радиационной безопасности		
					Средняя стоимость единицы предотвращенной дозы, долл. США/чел.-Зв	Пожизненный радиационный риск для населения от воздействия техногенной радиации за период планирования 36 лет	Соотношение пользы и издержек, млн. долл. США
Менее 2,28	До 20	Мониторинг радиационной обстановки	Менее 350	Менее 20	-	менее $2,5 \cdot 10^{-3}$	0
От 2,28 до 4,1	От 20 до 35	Первичные меры вмешательства	От 300 до 450	От 15 до 25	-	менее $3 \cdot 10^{-3}$	0
От 4.1 до 15.2 в том числе:	От 35 до 130	Дезактивация различной степени интенсивности	От 300 до 550	от 20 до 32	5200	от $2 \cdot 10^{-3}$ до $6,5 \cdot 10^{-3}$	0
4,1	35	Дезактивация кратностью $f=1,1$	550	32	5200	$6,5 \cdot 10^{-3}$	0
4,7	40	Дезактивация кратностью $f=1,43$	490	29	5200	$5 \cdot 10^{-3}$	0
5,9	50	Дезактивация кратностью $f=2$	440	26	5200	$4,5 \cdot 10^{-3}$	0
7	60	Дезактивация кратностью $f=3,33$	350	20	5200	$2,5 \cdot 10^{-3}$	0

Таблица 3.14 (продолжение)

От 8,8 до 15,2	От 75 до 130	Дезактивация кратностью $f=5$	От 380 до 550	От 23 до 35	5200	от $2 \cdot 10^{-3}$ до $4,8 \cdot 10^{-3}$	0
От 15,2 до 23,4	От 130 до 200	Временная эвакуация населения и дезактивация кратностью $f=5$	От 350 до 500	От 19 до 30	5200	от $4,5 \cdot 10^{-3}$ до $6,5 \cdot 10^{-3}$	0
Более 23,4	Более 200	Постоянное отселение жителей и консервация территории	Значение ЕРФ	Значение ЕРФ	10400	0	0

Таблица 3.15

Параметры оптимальной стратегии управления радиационной безопасностью крупного промышленного российского города, соответствующие задаче (3.33)

Доза облучения в начальный момент времени, мкЗв/час	Ожидаемая доза облучения в первый год после аварии, мЗв/год	Оптимальная стратегия управления	Остаточная пожизненная доза облучения (от естественных и техногенных источников), мЗв	Остаточная доза облучения в первый год после аварии, мЗв/год	Показатели эффективности мероприятий радиационной безопасности		
					Средняя стоимость единицы предотвращенной дозы, долл. США/чел.-Зв	Средний остаточный пожизненный радиационный риск населения от воздействия техногенной радиации	Соотношение пользы и издержек, млн. долл. США
Менее 2,28	До 20	Мониторинг радиационной обстановки	Менее 370	Менее 20	-	менее $2,5 \cdot 10^{-3}$	0
От 2,28 до 4,1	От 20 до 35	Первичные меры вмешательства	От 300 до 450	От 15 до 25	-	менее $3 \cdot 10^{-3}$	0
От 4.1 до 32 в том числе:	От 35 до 170	Дезактивация различной степени интенсивности	от 512 до 620	от 32 до 40	от 2400 до 5200	от $6,5 \cdot 10^{-3}$ до $7,5 \cdot 10^{-3}$	От 0 до 1300

Таблица 3.15 (продолжение)

4,1	35	Деактивация кратностью f=1,1	550	32	5200	$6,5 \cdot 10^{-3}$	0
4,7	40	Деактивация кратностью f=1,2	560	34	4900	$6,7 \cdot 10^{-3}$	7,3.
5,9	50	Деактивация кратностью f=1,43	576	36	4300	$6,8 \cdot 10^{-3}$	46
7,0	60	Деактивация кратностью f=1,8	590	37	4100	$7 \cdot 10^{-3}$	104,3
8,6	75	Деактивация кратностью f=2	620	40	3500	$7,5 \cdot 10^{-3}$	215,4
11,5	100	Деактивация кратностью f=3	620	40	3300	$7,5 \cdot 10^{-3}$	427,3
19	170	Деактивация кратностью f=5	620	40	2400	$7,5 \cdot 10^{-3}$	1300
От 19 до 23,4	От 170 до 200	Временная эвакуация населения и деактивация кратностью f=5	620	От 25 до 30	3200	$7,5 \cdot 10^{-3}$	718
Более 23,4	Более 200	Постоянное отселение жителей и консервация территории	Значение ЕРФ	Значение ЕРФ	10400	0	0

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие результаты:

1. Сформирована система статистических показателей, позволяющих количественно оценить величину радиационного риска и эффективность мероприятий по защите населения от избыточного (сверхфонового) облучения. В общем виде показатели радиационного риска классифицированы в рамках 3 групп: вероятностные, натуральные и стоимостные. На основе вероятностных показателей, исходя из концепции приемлемых уровней рисков, формируются нормативы радиационной безопасности. К ним относятся меры избыточного абсолютного и относительного рисков, а также пожизненный радиационный риск, которые представляют собой вероятности радиационно-обусловленной заболеваемости и смертности во все последующие после облучения годы жизни. Натуральные показатели позволяют определить временные потери лет жизни населения, обусловленные радиационным воздействием. Стоимостные показатели позволяют выразить эти временные потери в денежном эквиваленте, которые используются при экономическом обосновании мер вмешательства.

2. Предложены варианты критериев эффективности мероприятий, применяемых при чрезвычайных ситуациях с утечкой радиации. Среди них выделены максимизация выгоды от применения рискоснижающего мероприятия, определяемой как разность связанных с вмешательством пользой и издержками; минимизация стоимости единицы предотвращенной коллективной дозы облучения населения; максимизация удельной эффективности издержек защитной меры и минимизация остаточного после применения меры вмешательства радиационного риска для населения (представленного либо в виде вероятности радиационно-обусловленной смертности, либо в виде ожидаемой потери лет жизни населения).

3. Выявлены проблемы оценки радиационных рисков в диапазоне малых доз облучения на основе имеющейся статистической информации. В работе обосновано, что для получения статистически значимых оценок радиационных

рисков объем выборки числа смертей от онкологических заболеваний в исследуемой когорте должен превышать 25000 случаев, в то время как самая представительная на сегодняшний день исследуемая когорта насчитывает менее 10000 случаев. В связи с этим на практике для получения этих оценок применяется аппроксимация рисков из областей больших и средних доз в область низких на основе моделей зависимости «доза-эффект». В докладах МКРЗ и НКДАР представлено множество таких моделей, позволяющих оценить как обобщенные риски для населения в целом, так и индивидуализированные риски для отдельных половозрастных групп. Однако, несмотря на достаточно высокую степень адекватности этих моделей, они не учитывают ряд факторов, за счет которых может быть увеличена достоверность получаемых на их основе результатов.

4. В работе предложен модифицированный подход к оценке радиационного риска, базирующийся на уточнении исходной информации об онкологических эффектах воздействия доз облучения на основе кластеризации основных видов раковых заболеваний по критериям уровня избыточного относительного риска смерти от ракового заболевания в зависимости от времени прошедшего с момента облучения и коэффициентов летальности болезни. В результате кластеризации все онкологические заболевания классифицируются на три устойчивые группы: смертельные, несмертельные виды онкологических заболеваний и лейкемия. Для каждой из представленных групп на основе статистической информации о выживших после атомных бомбардировок в Хиросиме и Нагасаки построены модели оценки избыточного относительного риска.

5. На основе моделей оценки радиационного риска, представленных в докладе НКДАР ООН, и их авторских модификаций оценены вероятностные, натуральные и стоимостные оценки радиационного риска для жителей России. Усредненный пожизненный радиационный риск на 1 Зв облучения для населения в целом, рассчитанный согласно моделям НКДАР, равен  $5,23 \cdot 10^{-2}$  Зв<sup>-1</sup>. Фактически это означает, что при облучении жителей в России эквивалентной дозой 1 Зв вероятность смерти от онкологических заболеваний во все

последующие годы жизни в среднем увеличится на 5,23%. Для различных половозрастных групп эта оценка варьируется от  $0,54 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$  (жители старше 70 лет) до  $9,47 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$  (дети до 10 лет). Согласно авторским моделям усредненный пожизненный радиационный риск на 1 Зв облучения для населения в целом равен  $4,91 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$ , для различных половозрастных групп эта оценка варьируется от  $0,65 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$  (жители старше 70 лет) до  $10,2 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$  (дети до 10 лет).

Усредненный для всех половозрастных групп ожидаемый временной ущерб, рассчитанный на основе моделей НКДАР ООН и их авторских модификаций при остром облучении коллективной дозой 1 чел.-Зв жителей в России, эквивалентен потерям 0,79 и 0,75 чел.-лет жизни соответственно. Оценки по моделям НКДАР ООН для различных возрастных групп варьируются в диапазоне от 0,003 чел.-лет/чел.-Зв (жители старше 70 лет) до 1,844 чел.-лет/чел.-Зв (дети до 10 лет). Аналогичные показатели, полученные по авторским моделям, варьируются в диапазоне от 0,003 до 1,816 чел.-лет/чел.-Зв. На основе рассчитанных временных потерь жизни населения от радиационного воздействия в работе обоснованы стоимостные эквиваленты ущерба от коллективной дозы облучения 1 чел.-Зв для российской популяции при остром и хроническом облучениях в размере 10,4 и 5,2 тыс. долл. США/чел.-Зв соответственно.

б. На основе сопоставления пользы и издержек от реализации мероприятий радиационной безопасности в работе сформированы аналитические выражения для расчетов дозовых границ области эффективного применения дезактивации территории, временной эвакуации населения, полной консервации загрязненной территории, а также повышения качества медицинского обслуживания ликвидаторов радиационных аварий. При этом польза от проведения рискоснижающих мероприятий увязана с величиной предотвращенной каждым мероприятием дозой облучения, которая напрямую влияет на стоимостные оценки предотвращенных потерь населения, а также на оценки других предотвращенных потерь, например, связанных с сокращением периода прекращения хозяйственной деятельности на загрязненной территории. Издержки от проведения мероприятий включают в себе прямые затраты и косвенные

потери, которые рассчитываются статистическими, аналитическими и эконометрическими методами. Основной статей издержек при проведении дезактивации территории являются затраты на очистку и замену загрязненных поверхностей; при временной эвакуации населения – потери, связанные с остановкой производства в загрязненной зоне; при постоянном отселении – потери, связанные с утратой основных фондов и с выводом загрязненных земель из общего пользования.

Экономический эффект от улучшения качества медицинского обслуживания возникает из-за снижения среди облученных коэффициента смертности от раковых заболеваний. Этот эффект достигается за счет увеличения ежегодных среднелюдиных затрат на медицинское обслуживание, в том числе на ежегодную диагностику онкологических заболеваний.

7. На основе полученных в работе аналитических выражений пользы и издержек, связанных с применением мер вмешательства, обоснованы дозовые границы их эффективного применения при ликвидации последствий радиационной аварии в крупном промышленном городе в России. Проведенные расчеты показывают, что рассматриваемые защитные меры (дезактивация территории, временная эвакуация на период дезактивации территории и постоянное переселение жителей с полной консервацией территории) целесообразны соответственно при средних ожидаемых индивидуальных дозах облучения населения в первый год после аварии превышающих 35, 125 и 200 мЗв/год. Представленные в работе индивидуализированные оценки радиационных рисков позволяют обосновать эффективность временной эвакуации для детей и женщин детородного возраста при ожидаемой в первый год после аварии дозе облучения свыше 50 мЗв/год.

Обосновано, что повышение среднелюдиных годовых затрат на оказание медицинской помощи мужчинам-ликвидаторам радиационных аварий с 15 долл. США, установленных на территории России в 2012 году, до 63 долл. США в год при фактической дозе облучения 120 мЗв, до 78 долл. США в год при дозе 160 мЗв и до 110 долл. США в год дозе облучения 200 мЗв. Для женщин-



ликвидаторов аналогичное с мужчинами повышение ежегодных среднелюдиных затрат на медицинское обслуживание является обоснованным при дозах в среднем на 35% меньших, чем у мужчин.

8. Рассчитанные дозовые границы области эффективного применения различных мер вмешательств вместе с нормативами радиационной безопасности, установленными в России, используются в качестве ограничений в задаче поиска оптимальной стратегии управления последствия радиационных аварий. В работе рассмотрены постановки оптимизационных задач с критериями на максимум выгоды от применения рискоснижающего мероприятия и минимум остаточного после применения меры вмешательства радиационного риска для населения. В результате решения этих задач определены параметры стратегий управления последствиями радиационных аварий на территории России по рассмотренным в работе критериям:

а) Критерий на максимум выгоды:

- При ожидаемом в первый год после аварии облучении населения до 20 мЗв/год следует установить мониторинг радиационной обстановки на территории и при превышении этих границ облучения немедленно осведомить население о радиационной опасности;
- В диапазоне от 20 до 35 мЗв/год применять первичные меры вмешательства, а также меры «самопомощи» для населения;
- В диапазоне от 35 до 170 мЗв/год проводить дезактивацию территории различной интенсивности;
- В диапазоне от 170 до 200 мЗв/год рекомендуется временная эвакуация населения из загрязненной территории на момент ее дезактивации;
- При дозах свыше 200 мЗв/год обосновано постоянное переселение и полная консервация территории.
- При реализации предложенного комплекса мер вмешательства при любом сценарии развития аварии оцененная остаточная в первый год доза облучения населения не превысит 40 мЗв/год, а накопленная им за всю жизнь доза – 350 мЗв.

б) Критерий на минимум остаточного радиационного риска:

- При ожидаемом в первый год после аварии облучении населения до 20 мЗв/год следует установить мониторинг радиационной обстановки на территории и при превышении этих границ облучения немедленно осведомить население о радиационной опасности;
- В диапазоне от 20 до 35 мЗв/год применять первичные меры вмешательства, а также меры «самопомощи» для населения;
- В диапазоне от 35 до 130 мЗв/год проводить дезактивацию территории различной интенсивности;
- В диапазоне от 130 до 200 мЗв/год рекомендуется временная эвакуация населения из загрязненной территории на момент ее дезактивации;
- При дозах свыше 200 мЗв/год обосновано постоянное переселение и полная консервация территории.
- При реализации предложенного комплекса мер вмешательства при любом сценарии развития аварии оцененная остаточная в первый год доза облучения населения не превысит 35 мЗв/год, а накопленная им за всю жизнь доза – 270 мЗв,

Из полученных в работе результатов вытекают следующие выводы:

1. Исходная для оценки радиационных рисков при малых дозах облучения статистическая информация характеризуется неопределенностью и относительно низкой степенью полноты, что обуславливает необходимость при получении таких оценок использовать дополнительные процедуры, повышающие их достоверность и обоснованность. В работе показано, что для этих целей могут быть использованы процедуры аппроксимации рисков из области больших и средних доз облучения в область низких, а также приемы повышения однородности выборки на основе группировки информационных массивов по онкологической заболеваемости по признакам вида онкологических заболеваний, уровня радиационно-обусловленной смертности, открытого и закрытого латентного периода протекания болезни и коэффициентов летальности.

2. Уровень радиационного риска, зависящий от мощности и интенсивности доз облучения, подвержен влиянию и ряда других факторов. Например, население женского пола обладает большей радиочувствительностью по сравнению с

мужским населением, уровень радиационного риска снижается по экспоненциальной кривой с увеличением возраста на момент облучения и увеличивается с ростом ожидаемой продолжительности жизни населения. Представленные в работе авторские модели оценки радиационных рисков в полной мере учитывают эти закономерности и позволяют рассчитывать индивидуализированные радиационные риски для различных половозрастных групп и регионов страны и, с учетом демографической структуры населения, усредненные оценки рисков для всей популяции.

3. Уточненные оценки радиационных рисков для жителей России, полученные на основе авторских моделей, несколько ниже аналогичных оценок, рассчитанных согласно моделям НКДАР и МКРЗ, а также значений рисков, определенных для жителей Великобритании, Китая, США, Японии и Пуэрто-Рико. Это является следствием различий в демографических и популяционных особенностях, а также в структурах фоновой онкологической заболеваемости и смертности в России и этих странах.

4. Определение границ эффективного использования мероприятий радиационной безопасности в значительной степени упрощает местным органам управления процедуру организации безопасной жизнедеятельности на территории при чрезвычайных ситуациях с утечкой радиации. Предложенные авторские статистические методы оценки этих границ в полной мере позволяют учитывать социально-экономические особенности региона, на территории которого произошел инцидент, и позволяют определить и обосновать наиболее эффективные варианты стратегий вмешательства при различных сценариях развития аварии.

5. На значение нижней границы эффективного использования защитных мероприятий в значительной степени влияют такие факторы как плотность населения, проживающего на загрязненных территориях, размер среднедушевого национального дохода, экономическая значимость региона, а также издержки, связанные с проведением защитных мер. На территориях характеризующихся большей плотностью населения, более высоким уровнем среднедушевого дохода

и экономической значимостью применение защитных мер будет обоснованным при меньшем уровне загрязненности региона. Вместе с тем наиболее затратные меры вмешательства становятся эффективными при увеличении исходных доз облучения.

6. Увеличение затрат на медицинское обслуживание ликвидаторов радиационных аварий в России является весьма эффективной социальной мерой при фактических дозах их облучения свыше 100 мЗв. По предварительным подсчетам, такое вмешательство позволит значительно снизить уровень онкологической смертности среди ликвидаторов за счет ежегодной их диспансеризации и диагностики онкозаболеваний.

7. Предложенные в работе критерии эффективности позволяют обосновать ряд рациональных (оптимальных с точки зрения каждого критерия) стратегий по ликвидации последствий радиационных аварий, которые характеризуются различными уровнями издержек и степенью безопасности для населения. На практике выбор наиболее приемлемой из них может осуществляться местными органами управления, с учетом местных условий, включая размер бюджета, сопоставления уровня радиационного риска с приемлемыми уровнями безопасности жизнедеятельности и ряда других.

8. Полученные в работе оценки остаточных для населения доз облучения согласно предложенным оптимальным стратегиям управления радиационными рисками позволяют утверждать, что на территории России допустимые значения этих доз при аварийных ситуациях следует устанавливать на уровне 35-40 мЗв в первый год после аварии. Эти результаты не противоречат предложенному МКРЗ двухуровневому подходу нормирования радиационной безопасности, согласно которому в диапазоне от 20 до 100 мЗв/год облучения населения решения о применении мер вмешательств осуществляются на усмотрение местных органов управления.

9. Значения допустимых остаточных доз облучения населения при аварийных ситуациях будут значительно варьироваться на территориях различных стран в зависимости от их экономических возможностей. В развитых

странах с высоким уровнем среднедушевого национального дохода эти границы будут более жесткими по сравнению со странами, ресурсный потенциал которых не столь высокий. Полученный результат напрямую отражает тот факт, что богатые страны обладают большими экономическими возможностями, что позволит им вести максимально жесткую политику в сфере обеспечения радиационной безопасности на национальном уровне.

**Список сокращений и условных обозначений**

DDREF – dose and dose-rate effectiveness factor, обобщённый коэффициент эффективности и мощности дозы;

EAR – excess absolute risk, избыточный абсолютный риск

ERR – excess relative risk, избыточный относительный риск

REID – risk of exposure-induced death, Пожизненный риск радиационно-обусловленной смерти

LSS – life span study, радиационно-эпидемиологическое исследование выживших после атомной бомбардировки в Хиросиме и Нагасаки в 1945 году;

LLE – life lost expectancy, ожидаемая потеря лет жизни индивидуума;

ЕРФ – естественный радиационный фон;

ЗНО – злокачественное новообразование;

ЗЖК – зона жесткого контроля;

ЛБК – линейная беспороговая концепция;

МАГАТЭ – Международное агентство по атомной энергии;

МКРЗ – Международная комиссия по радиационной защите;

НКДАР ООН – Научный комитет по действию атомной радиации Организации объединенных наций;

НКРЗ – Национальная комиссия по радиационной защите;

НРБ – нормы радиационной безопасности;

ОС – окружающая среда;

ЧАЭС – Чернобыльская атомная электростанция.

**Список литературы**

1. Авария на АЭС «Фукусима-1»: опыт реагирования и уроки / Под общей редакцией чл.-корр. РАН Л.А. Большова. – М.: Наука, 2013. – 246 с.
2. Арутюнян Р.В. Современный взгляд на нормирование радиационной безопасности / Р.В. Арутюнян, Л.А. Большов, О.А. Павловский // Атомная энергия. – М.: Редакция журнала «Атомная энергия», 2009. – № 5. – С. 285-297.
3. 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 И.М. Богдевича. – Москва-Минск: Фонд «Инфосфера»-НИА-Природа, 2009. – 140 с.
4. Атомная отрасль России. [Электронный ресурс]. – Ресурс доступа: <http://www.rosatom.ru/nuclearindustry/russainnuclearindustry>. – (Дата обращения 10.06.14).
5. Блинова Е.А. Применение генетических и цитогенетических маркеров для формирования групп повышенного онкологического риска при радиационном облучении / Е.А. Блинова, Г.А. Веремеева // Вестник ЧелГУ: - Челябинск, ГОУ ВПО «ЧелГУ», 2013. – №7. – С. 88-90.
6. Богданов И.М. Проблема оценки эффектов воздействия «малых» доз ионизирующего излучения / И.М. Богданов, М.А. Сорокина, А.И. Маслюк // Бюллетень сибирской медицины. – Северск: СибГМУ, 2005. – Вып. №2. – С. 145-151.
7. Ваганов П.А. Риск смерти и цена жизни / П.А. Ваганов // Правоведение. – Санкт-Петербург: Издательство СПбГУ, 1999. – №3. – С. 67-82.
8. Влияние ионизирующей радиации на здоровье населения вследствие проведения ядерных испытаний в Казахстане. Сообщение 1 / Б.И. Гусев [и др.] // Радиоэкология. Охрана окружающей среды. Выпуск 3, Вестник НЯЦ РК – 2002, С. 171 – 173.
9. Влияние ионизирующей радиации на здоровье населения вследствие проведения ядерных испытаний в Казахстане. Сообщение 2 / Б. Гроше [и др.] //

Радиоэкология. Охрана окружающей среды. Выпуск 3, Вестник НЯЦ РК – 2002, С. 174 – 178.

10. Волобуев П.В. Оценка эффективности реабилитации населения и территорий при радиационном воздействии / П.В. Волобуев, К.И. Корякин // Экономика региона. – Екатеринбург: Учреждение РАН ИЭ УрО РАН, 2010. – №1. – С.105-110.

11. Вопросы дозиметрии и радиационная безопасность на атомных электрических станциях/ Учебное пособие под ред. А.В. Носовского.- Славутич: «Укратоиздат», 1998. – 372 с.

12. Воробьев Ю.Л. Основные направления государственной стратегии управления рисками на пороге XXI века / Ю.Л. Воробьев // Шестая всероссийская научно-практическая конференция «Управление рисками чрезвычайных ситуаций», Москва, 20–21 марта 2001г. Доклады и выступления. – М.: «Крук», 2001. – С.12–21.

13. Горбачев Д.О. Оценка уровней радиационных рисков при контакте с источниками ионизирующего излучения / Д.О. Горбачев, И.В. Широлапов // Здоровье и образование в XXI веке. – Калининград: Некоммерческое партнерство «Сообщество молодых врачей и организаторов здравоохранения», 2011. – №2. – С. 236-237.

14. Горский А.И. Латентный период индукции радиогенных солидных раков в когорте ликвидаторов / А.И. Горский, В.В. Кашеев, К.А. Туманов // Радиация и риск (Бюллетень НРЭР). – Обнинск: ФГБУ МРНЦ Министерства здравоохранения РФ, 2008. – №2. – С. 30-38.

15. Детлаф А.А. Курс физики (в трех томах): Учебное пособие / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – 3-е изд., перераб. и доп. – М: Высшая школа, 1979. – Т. 3. – 511 с.

16. Дозиметрические данные Российского государственного медико-дозиметрического регистра для ликвидаторов. Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра) / В.А. Питкевич [и др.] – Москва-Обнинск: МРНЦ РАМН, 1995. – №95. – 44 с.



17. Единая межведомственная информационно-статистическая система. Площадь земель промышленности и иного специального назначения. [Электронный ресурс]. – Ресурс доступа: <http://fedstat.ru/> - заглавие с экрана. – (Дата обращения: 20.05.2014).

18. Ефремов С.В. Безопасность в чрезвычайных ситуациях: учебное пособие / С.В. Ефремов, В.В. Цаплин. – СПб: СПбГАСУ, 2011 – 296 с.

19. Заболеваемость и смертность участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС: оценка радиационных рисков, период наблюдения 1992-2008 гг. / В.К. Иванов [и др.] // Радиационная гигиена. – Обнинск: ФГУП МРНЦ, 2011. – №2. – С. 40-49.

20. Заболеваемость участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС: Оценка радиационных рисков, период наблюдения 1992-2009 гг. / В.В. Кашеев [и др.] // Радиация и риск (Бюллетень НРЭР). – Обнинск: ФГБУ МРНЦ Министерства здравоохранения РФ, 2014. – Вып №1. – С. 19-31.

21. Зависимость радиационного риска солидных раков среди ликвидаторов последствий аварий на Чернобыльской АЭС от возраста при облучении / В.В. Кашеев [и др.] // Радиация и риск (Бюллетень НРЭР). – Обнинск: ФГБУ МРНЦ Министерства здравоохранения РФ, 2009. – Вып №3. – С. 48-53.

22. Звонова И. А. Оценка поглощенной дозы в щитовидной железе плода и новорожденных после аварии на Чернобыльской АЭС / И. А. Звонова // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). – Москва-Обнинск: МРНЦ РАМН, 1997. – №10. – С.117-123.

23. Злокачественные новообразования в России в 2012 году (заболеваемость и смертность) / Под редакцией А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. – М: ФГБУ «МНИОИ им. П.А. Герцена» Минздрава России, 2014. – 250 с.

24. Иванов В.К. Радиационно-эпидемиологический сектор: развитие современных технологий оценки рисков здоровью и оптимизации радиационной защиты населения России / В.К. Иванов, А.Ф. Цыб, М.А. Максюттов // Радиация и риск (Бюллетень НРЭР). – Обнинск: ФГБУ МРНЦ Министерства здравоохранения РФ, 2012. – Вып. № 3. – С. 41-54.

25. Иванов Е.П. Радиационный гормезис, малые дозы и заболеваемость острой лейкемии детей Беларуси: 20 лет после аварии на чернобыльской АЭС / Е.П. Иванов, Т.И. Терехович, В.Е. Иванов // Материалы V Международной конференции, 6–7 апр. 2007 г., Минск. – Мн.: Изд. центр БГУ, 2007. С. 119-121.

26. Ивановский Ю.А. Радиационный гормезис. Благоприятны ли малые дозы ионизирующей радиации? / Ю.А. Ивановский // Вестник ДВО РАН. – Владивосток: Президиум ДВО РАН, 2006. – №. 6. – С. 86-91.

27. Израэль Ю.А. Радиоационный мониторинг окружающей среды после Чернобыльской аварии: 15 лет после Чернобыля: уроки оценки перспективы. / Ю.А. Израэль. – М: Институт глобального климата и экологии, 2002. – 35 с.

28. Институт демографии Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики». Таблица смертности населения России для календарного года 2010 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.demoscope.ru/weekly/ssp/rus\\_lt.php?year=52](http://www.demoscope.ru/weekly/ssp/rus_lt.php?year=52). – (дата обращения: 20.01.2014).

29. Институт проблем безопасного развития атомной энергетики. Чернобыль в трех измерениях (подготовлено по материалам И.И. Линге и С.В. Казакова). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ibrae.ac.ru/> – заглавие с экрана. – (дата обращения: 01.12.2014).

30. Исследования влияния неопределенности доз облучения на прогноз радиационных рисков солидных раков по моделям МКРЗ для российских популяций при однократном облучении / В. К. Иванов [и др.] // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). – Обнинск: ФГБУ МРНЦ, 2013. – №5, Том 22. – С. 8-13.

31. Исследование влияния неопределенности фоновых показателей заболеваемости на прогноз радиационных рисков по моделям МКРЗ для российской популяции при однократном облучении / В.К. Иванов [и др.] // Радиация и риск (Бюллетень НРЭР). – Обнинск: ФГБУ МРНЦ Министерства здравоохранения РФ, 2013. – №3. – С. 40-56.

32. Итоговый отчет по 2 этапу госконтракта № 26/3.1.3.1-1008600 от

18.06.2012 «Совершенствование программного и методического обеспечения государственной радиационно-эпидемиологической регистрации граждан на федеральном и региональном уровнях и актуализация радиационно-эпидемиологического регистра». / А.Ф Цыб [и др.]. – Москва-Обнинск: Министерство РФ по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2012. – 460 с.

33. Козлова В.В. Оценка и анализ радиационного риска в сравнении с другими факторами воздействия на население (на примере Ульяновской области) / В.В. Козлова // Известия Самарского научного центра РАН. – Самара: ФГБУН Самарский научный центр РАН, 2010. – №1-9, Т. 12. – С. 2294-2297.

34. Концепция оптимизации системы радиационной защиты в атомной отрасли: управление индивидуальными канцерогенными рисками и оказание адресной медицинской помощи. Радиация и риск (Бюллетень НРЭР) / В.К. Иванов [и др.] – Москва-Обнинск: МРНЦ РАМН, 2004. – 62 с.

35. Коэффициенты радиационных рисков для российского населения при однократном и пролонгированном облучении / С.Ю. Чекин [и др.] // Радиация и риск (Бюллетень НРЭР). – Обнинск: ФГБУ МРНЦ Министерства здравоохранения РФ, 2014. – №1. – С. 51-66.

36. Крюк Ю.Е. Информационные системы и управление радиационным риском / Ю.Е. Крюк // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2013. – №19. – С. 53-59.

37. Кузин А.М. Идеи радиационного гормезиса в атомном веке / А.М. Кузин. – М.: Наука, 1995. – 158 с.

38. Курс лекций проф., д.х.н. Бекмана И.Н. «Ядерная индустрия» [Электронный ресурс]. – Ресурс доступа: <http://profbeckman.narod.ru/NI.htm>. – (Дата обращения 10.01.2014).

39. Линдербратен Л.Д. Медицинская радиология (основы лучевой диагностики и лучевой терапии): Учебник / Л.Д. Линденбратен, И.П. Королук – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Медицина, 2000. – 672 с.

40. Марченко Т.А. Гендерные особенности проявления социально-

психологических проблем населения, проживающего на радиоактивно загрязненных территориях / Т.А. Марченко, Т.Б. Мельницкая, А.В. Хавыло // Ученые записки университета им. П.Ф. Лесгафта. – Санкт-Петербург: ФГОУ ВПО НГУФКСиЗ им. П.Ф. Лесгафта, 2014. – №2. – С. 97-103.

41. Махонько К.П. Динамика накопления радиойода на почве и реконструкция доз от его излучения на территории СНГ, загрязненной после аварии на Чернобыльской АЭС / К.П. Махонько, Е.Г. Козлова, А.А. Волокитин // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). – Москва-Обнинск: МРНЦ РАМН, 1996. – №7. – С.140-191.

42. Мельницкая Т.Б. Переживание радиационного риска у разных возрастных групп / Т.Б. Мельницкая // Психопедагогика в правоохранительных органах. – Омск: ФГБОУ ВПО «Омская академия МВД РФ», 2009. – №2. – С. 41-45.

43. Мельницкая Т.Б. Социально-психологические последствия переживания радиационного риска у населения России и Беларуси / Т.Б. Мельницкая, А.В. Симонов, Т.В. Белых // Ученые записки университета П.Ф. Лесгафта. – Санкт-Петербург: ФГОУ ВПО НГУФКСиЗ им. П.Ф. Лесгафта, 2010.- №4. – С. 66-71.

44. МКРЗ. Труды МКРЗ. Рекомендации Международной комиссии по радиационной защите от 2007 г. Публикация 103 МКРЗ. Утверждена в марте 2007г. / Перевод с англ. под общей ред. М.Ф. Киселева и Н.К. Шандалы. – М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. – 343 с.

45. Некоторые эффекты радиационного гормезиса бактериальных и дрожжевых клеток / В.Г. Петин [и др.] // Радиационная биология. Радиоэкология. – М.: МАИК «Наука/Interperiodica», 2003. – № 43. – С. 176-178.

46. Нормы радиационной безопасности (НРБ – 99). Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. – М.: Минздрав России, 1999. – 72 с.

47. Обеснюк В.Ф. Ложный “гормезис” и истинные горметические эффекты. Ошибка Бернарда Коэна / В.Ф. Обеснюк // Исследовано в России. Озерск:

ЮУрИБФ, 2011. – №54. - С. 685–704.

48. Обеснюк В.Ф. Пожизненный онкологический риск в широком диапазоне доз ионизирующей радиации / В.Ф. Обеснюк // Исследовано в России. Озерск: ЮУрИБФ, 2011. – №51. – С. 51–76.

49. Онкологический информационный ресурс. Цены на лечение онкологии в Израиле. [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.onkologiya-info.ru/> - заглавие с экрана. – (Дата обращения: 20.05.2014).

50. Онкологический информационный ресурс. Цены на лечение рака по городам России. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.onkologiya-info.ru/> - заглавие с экрана. – (Дата обращения: 20.05.2014).

51. Онкологический центр Н.Н. Блохина. Лечение и диагностика онкологических заболеваний [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ondoctor.ru> – заглавие с экрана. – (Дата обращения: 01.02.2013).

52. Оптимизация социальной защиты персонала Госкорпорации «Росатом» на объектном и отраслевом уровнях на основе международных стандартов по оценке индивидуальных радиационных рисков / В.К. Иванов [и др.] // Радиация и риск (Бюллетень НРЭР). – Обнинск: ФГБУ МРНЦ Министерства здравоохранения РФ, 2012. – №1. – С. 5-19.

53. Оценка индивидуальных радиационных рисков при различных сценариях профессионального хронического облучения / В.К. Иванов [и др.] // Радиация и риск (Бюллетень НРЭР). – Обнинск: ФГБУ МРНЦ Министерства здравоохранения РФ, 2008. – №2. – С. 9-29.

54. Оценка профессиональных радиационных рисков персонала Госкорпорации «Росатом», включенного в систему АРМИР / В.К. Иванов [и др.] // Радиация и риск. – Москва-Обнинск: ФГБУ МРНЦ Миндравсоцразвития, 2012. – №3. – Т. 21. – С. 60-74.

55. Оценка радиационного риска медицинского облучения в терминах эффективной и органических доз / В.К. Иванов [и др.] // Радиация и риск (Бюллетень НРЭР). – Обнинск: ФГБУ МРНЦ Министерства здравоохранения РФ, 2012. – №4. – С. 7-23.

56. Оценка экологического риска радиационного воздействия для природных экосистем, загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС / Т.А. Майстренко [и др.] // Известия Коми научного центра УРО РАН. – Сыктывкар: ФГБУ науки Коми НЦУрО РАН, 2013 – №3. – С. 41-47.

57. Перевозников О.Н. Индивидуальная дозиметрия при радиационных авариях: Монография / О.Н. Перевозников, А.А. Ключников, В.А. Канченко – Чернобыль: Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2007. – 200 с.

58. Повышение эффективности социальной защиты персонала Госкорпорации «Росатом» с учетом оценки индивидуальных радиационных рисков / В.К. Иванов [и др.] // Радиация и риск (Бюллетень НРЭР). – Обнинск: ФГБУ МРНЦ Министерства здравоохранения РФ, 2011. – №2. – С. 8-16.

59. Приказ Президента РФ «Основы государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025» от 1 марта 2012 г. № 539 // СПС «Консультант Плюс». – 2012.

60. Приказ Ростехнадзора «Об утверждении Положения о прогнозировании индивидуальных радиационных рисков персонала и населения при нормальной эксплуатации и возможных авариях на объектах использования атомной энергии» от 14.07.2010 № 605 // СПС «Консультант Плюс». – 2010.

61. Проект Нововоронежской АЭС-2 ОАО «Атомэнергопроект» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rosatom.ru/resources> – заглавие с экрана. – (дата обращения 01.12.2014).

62. Радиационные риски медицинского облучения / В.К. Иванов [и др.] // Радиация и риск (Бюллетень НРЭР). – Обнинск: ФГБУ МРНЦ Министерства здравоохранения РФ, 2011. – №2. – С. 17-29.

63. Радиационный риск персонала Госкорпорации «Росатом» в 2013 году (по данным системы АРМИР) / В.К. Иванов [и др.] // Радиация и риск (Бюллетень НРЭР). – Обнинск: ФГБУ МРНЦ Министерства здравоохранения РФ, 2014. – № 1. – С. 10-18.

64. Рождественский Л.М. Концепция биологического действия ионизирующей радиации низкого уровня (анализ проблемы в аспектах

пороговости эффектов и радиочувствительности радиореактивности биоструктур различного уровня организации) / Л.М. Рождественский // Радиационная биология. Радиоэкология. – М.: МАИК «Наука/Interperiodica», 1999. – №39. – Т. № 1. – С. 127–144.

65. Российский национальный доклад «25 лет Чернобыльской аварии. Итоги и перспективы преодоления ее последствий в России 1986-2011» / Под общей редакцией С.К. Шойгу, Л.А. Большова. – М: Министерство РФ по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2011. – 160 С.

66. Сарапульцева Е.И. Радиационные риски смертности и сокращение продолжительности жизни у облученных в малых дозах дафний / Е.И. Сарапульцева, А.И. Горский, Ю.Ю. Малина // Радиация и риск (Бюллетень НРЭР). – Обнинск: ФГБУ МРНЦ Министерства здравоохранения РФ, 2011. – № 1. – С. 34-40.

67. Семенов А.П. ядерная энергетика: панацея или угроза экологии? (Критический взгляд на проблему). – М.: Изд. Россельхозакадемия, 2005. – 95 с.

68. Сопоставительный анализ радиационных и химических рисков для здоровья населения Красноярского края / Р.В. Арутюнян [и др.] // Радиация и риск (Бюллетень НРЭР). – Обнинск: ФГБУ МРНЦ Министерства здравоохранения РФ, 2014. – №2. – С. 123-136.

69. Техногенное облучение и безопасность человека/ Л.А. Ильин [и др.]. – М.: ИздАТ, 2006. – 304 с.

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

71. Тихомиров Н.П. Методы эконометрики и многомерного статистического анализа / Н.П. Тихомиров, Т.М. Тихомирова, О. С. Ушмаев. – М.: Изд. «Экономика», 2011. – 640 с.

72. Тихомиров Н.П. Риск анализ в экономике / Н.П. Тихомиров, Т.М. Тихомирова. – М.: Изд. «Экономика», 2010. – 318с.

73. Тихомиров Н.П. Статические методы оценки радиационных рисков и нормативы безопасности / Н.П. Тихомиров, Т.М. Тихомирова, Д.Ф. Ильясов // Сборник «Методы количественных исследований процессов модернизации экономики и социальной сферы России». Материалы конференции. 15-16 марта 2012. – М.: ФГБОУ ВПО «РЭУ им. Г.В. Плеханова», 2012. – С. 366-375.

74. Тихомиров Н.П. Методы нормирования радиационной безопасности на основе приведенных оценок онкологических рисков / Н.П. Тихомиров, Т.М. Тихомирова, Д.Ф. Ильясов // Инновационные информационные технологии: Материалы международной научно-практической конференции. – М.: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013. – Т. 4 – С. 274-281.

75. Тобратов С.А. Пространственные закономерности дифференциации радионуклидов в ландшафтах Рязанской области и их индикационное значение / С.А. Тобратов, О.С. Железнова // Вестник РГУ им. С.А. Есенина. – Рязань: ГОУ ВПО «РГУ им. С.А. Есенина», 2012. – № 4. – С. 4-26.

76. Указ Президента РФ «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники и перечня критических технологий Российской Федерации» от 7 июля 2011 г. № 899 // СПС «Консультант Плюс». – 2011.

77. Усманов С.М. Радиация: Справочные материалы. – М.: Гуманит изд. центр ВЛАДОС, 2001. – 176 с.

78. Фарахов А.З. Основные подходы и особенности оказания гражданам Российской Федерации высокотехнологичной медицинской помощи в 2014 году [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.rosminzdrav.ru](http://www.rosminzdrav.ru) – заглавие с экрана. – (Дата обращения: 20.05.2014).

79. Федеральная служба государственной статистики. Демографический ежегодник России – 2012 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gks.ru> – заглавие экрана (дата обращения 20.01.2014).

80. Федеральная служба государственной статистики. Условия труда, производственный травматизм [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gks.ru> – заглавие экрана. – (Дата обращения 20.05.2014).



81. Шафигов А.М. Радиационные риски в Российской Федерации и зарубежных странах: понятие, виды и способы защиты / А.М. Шафигов // Вестник ЮУрГУ. – Челябинск: ГОУ ВПО ЮУрГУ. – №6. – С. 84-87.

82. Яблоков А. В. Миф о безопасности малых доз радиации. – М.: Центр экологической политики России, 2002. – 180 с.

83. Яворский З. Реалистическая оценка воздействия аварии на чернобыльской АЭС на здоровье людей// Атомная энергия. – М.: Некомерческая организация «Редакция журнала «Атомная энергия», 1999. – № 2. – Т. № 86.– С.140-150.

84. Ярмоненко С.П. Низкие уровни излучения и здоровье: радиобиологические аспекты // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – М.: ФГБУ ГНЦ РФ «ФМБЦ им. А.И. Бурназяна», 2000. – № 3. – Т. 45. – С. 5–32.

85. Abbat J.D. Epidemiological studies in three corporations covering the Canadian nuclear fuel cycle; Biological effects of low level radiation / J.D. Abbat, T.R. Hamilton, J.L. Weeks. – Vienna: IAEA, 1983. – 351 p.

86. Abelson P.A. Testing for carcinogens with rodents / P.A. Abelson. – US: American association for the advancement of science, 1990. – 249 p.

87. Abelson P.H. Risk assesment of low level exposure. Science. – US: American association for the advancement of science, 1994. – 265 p.

88. Bengtsson, G. Vad kan vi Isra av Tjernobyl. SSI-report, . – Sweden: The Swedish Radiation Protection Institute, 1986. – 86 p.

89. Burke R.P. Economic risks of nuclear power reactor accidents / Burke R.P. Aldrich D.C., Rasmussen N.C. – Massachusetts: Sandia National Laboratories, 1984. – 71 p.

90. Cancer incidence in five continents Vol. VIII / D.M. Parkin [etc.]. – France: IARC, 2002. – 155 p.

91. Cancer mortality risk among workers at the Mayak Nuclear / N.S. Shilnikova [etc.] // Radiation Researh. – Tokyo: Radiation research society, 2003. – I. №159. – P. 787–798

92. Cancer risks attributable to low doses of ionizing radiation: assessing what we really know / D.J. Brenner [etc.] // Proceedings of the National Academy of Sciences. – US: NAS, 2003. – I. №100. – P. 13761-13766.

93. Committee on Medical Aspects of Radiation in the Environment (COMARE). Tenth Report / chairman prof. B.A. Bridges. – Great Britain: Health Protection Agency, 2005. – 46 p.

94. Coursaget J. European Union facing radioprotection standards / J. Coursaget, P. Pellezin // The Effects of Low and Very Low Doses of Ionizing Radiation on Human Health.– Netherlands: Elsevier Science B.V., 2000. – P. 35-38.

95. Crick M.J. Derived intervention levels for invoking countermeasures in the management of contaminated agricultural environments. Division of nuclear safety. / M.J. Crick. – Vienna: IAEA, 1991. – 23p.

96. Decision support handbook for recovery of contaminated inhabited areas. / Anderson K. G. [etc.]. – Denmark: Riso National Laboratory, 2008. – 141 p.

97. Doll R. The age distribution of cancer: implications for models of carcinogenesis / R. Doll //Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General). – UK: NCBI, 1971. – P. 133-166.

98. Effect of recent changes in atomic bomb survivor dosimetry on cancer mortality risk estimates / D.L. Preston [etc.] // Radiation research. — Tokyo: Radiation research society, 2004. – I. № 162. – P. 377-389.

99. Epidemiological investigation of radiological effects in high background radiation areas of Yangjiang China / Wei L. [etc.] // J. Radiation Res. – USA.: Radiation Research Society, 1990. – V. 31. – N 1. – P. 119-136.

100. Estimates of late radiation risks to the UK population. / C. R. Muirhead [etc.]. – UK: National Radiological Protection Board, 1993. – 157 p.

101. Fabrikant J.I. Radon and lung cancer: the BEIR IV Report / J.I. Fabrikant // Health Physics. – US: Lippincott Williams and Wilkins, 1990. – P. 89-97.

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

103. Goffman J. W. Radiation from medical procedures in the pathogenesis of cancer and ischemic heart disease. – USA: Committee for nuclear responsibility, 1999. – 699 p.

104. Goss S.G. National Radiological Protection Board (NRPB) Report / S.G. Goss // Health Physics. – US: Lippincott Williams and Wilkins, 1975, - V. 29. – P. 715-727

105. Gribbin M.A. Cancer mortality (1956–1985) among male employees of Atomic Energy Limited with respect to occupational exposure to low-linear-energy-transfer ionizing radiation / M.A. Gribbin, J.L. Weeks, G.R. Howe // Radiation Research. – USA: Radiation research society, 1993. – Vol. 133. – N 2. – P. 375-380.

106. High levels of natural radiation: dose and health effects / Sugahara T. [etc.]. // International congress series. – Netherlands: Elsevier Science B.V., 1997. – P. 36-38.

107. ICRP Publication 26. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Annals of the ICRP. – Oxford: Pergamon Press, 1977. – V. 21. – 87 p.

108. ICRP Publication 60: The 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Annals of the ICRP. – Oxford: Pergamon Press, 1991. – Vol. 21, №1-3. – 249 p.

109. Intervention criteria in a nuclear or radiation emergency. Safety series No. 109. – Vienna: IAEA, 1994. – 117 p.

110. International Atomic Energy Agency (IAEA). Nuclear power reactors in the World. 2012 Edition. – Vienna: IAEA, 2012, – 79 p.

111. Jaworowski Z. Radiation risk and ethics / Z. Jaworowski // Physics Today. – College Park, Maryland: AIP publishing, 1999. – Vol.52. P.24-29.

112. Javorovski Z. Realistic Assessment of Chernobyl's Health Effects. / Javorovski Z. – USA: Century Science and technology, 1998, v. 11, № 1. – P.14 – 25.

113. Kellerer A.M. Risk estimates for radiation induced cancer. The epidemiological evidence / A.M. Kellerer // The Effects of Low and Very Low Doses of Ionizing Radiation on Human Health – Netherlands: Elsevier Science B.V., 2000. – P. 47-57.

114. Kuchenhoff H. Effect of Berkson measurement error on parameter estimates in Cox regression models / H. Kuchenhoff, R. Bender, I. Langner // Lifetime data analysis. – US: Springer Science, 2007. – I. № 13. – P. 261-272.

115. Lochard J. Diffusion of optimization principle in France / J. Lochard // J. Radiological Protection. – Great Britain: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 1995. – v.15, No 2. – P.133-142.

116. Luan Y.C. The experiences in practicing of the radiation protection measures based on ICRP recommendation in Taiwan. / Y.C. Luan, W.L. Chen, W.K. Wang // The Effects of Low and Very Low Doses of Ionizing Radiation on Human Health. – Netherlands: Elsevier Science B.V., 2000. – P. 503-511.

117. Mitchell T.J. A method for estimating occupational radiation dose to individuals, using weekly dosimetry data / T.J. Mitchell, G. Ostrouchov, E.L. Frome // Radiation Research. – Tokyo: Radiation research society, 1997. – I. № 142(2). – P. 195-207.

118. Nambi K.S.V. Environmental radiation and cancer in India / K.S.V. Nambi, S.D. Soman // Health Physics. US: Lippincott Williams and Wilkins, 1987. – Vol. 52. – N. 5. – P. 653-657.

119. National Research Council (NRC). Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation. Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII-Phase 2. – Washington, DC: The national academy press, 2005. – 406 p.

120. National Research Council (NRC). Health effects of exposure to low levels of ionizing radiation (Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations, BEIR V). - Washington, D.C.: National Academy Press, 1990. – 401 p.

121. Pearson E.S. Biometrika. / E.S. Pearson, J. Wishart // Student's Collected Papers. – Cambridge: Cambridge University Press, 1942. – P. 11-34.

122. Radiation effects research foundation website. Database [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rerf.jp> – заглавие с экрана. – (дата обращения 20.10.2012).

123. Raman E. Mortality among Canadian military personel exposed to low-dose

radiation / E. Raman, C.S. Dulberg, R.A. Spasoff. // Canadian medical association journal – Canada: Canadian medical association, 1987. – Vol. 136. – P. 1951-1955.

124. Reichmuth B. Economic Consequences of a Rad. Nuc. Attack: Cleanup Standards Significantly Affect Cost. Working Together: Research & Development Partnerships in Homeland Security Conference. / B. Reichmuth, S. Short, T. Wood – Boston: International security Partnership, 2005. – 24 p.

125. Response in the late phase to a radiological emergency/ Morrey M. [etc.] // Radiat Prot Dosimetry. – Oxford: Oxford University Press, 2004. – Vol. 109. – P. 89-96.

126. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958-1998 / D.L. Preston [etc.] // Radiation research. – Tokyo: Radiation research society, 2007. – I. №168. – P. 1-64.

127. Some aspects of measurement error in explanatory variables for continuous and binary regression models / G. K. Reeves [etc.] // Statistics in medicine. – UK: John Wiley and Sons, 1998. – I. №. 19. – P. 2157-2177.

128. Studies of the mortality of atomic bomb survivors. report 12, Part 1 Cancer: 1950-1990 / D. Piece [etc.] // Radiation Research – Tokyo: Radiation research society, 1996. – P. 4-27.

129. Studies of the mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and noncancer disease mortality: 1950-1997 / D.L. Preston [etc.] // Radiation research. – Tokyo: Radiation research society, 2003. – I. 160. – P. 381-407.

130. Studies of the mortality of atomic bomb survivors, report 14, 1950-2003: an overview of cancer and noncancer diseases / K. Ozasa [etc.] // Radiation research. – Tokyo: Radiation research society, 2011. – I. 177. – P. 229-243.

131. Tubiana M. Radiation risks in perspective: radio-induced cancer among cancer risks / M. Tubiana // The Effects of Low and Very Low Doses of Ionizing Radiation on Human Health, – Netherlands: Elsevier Science B.V., 2000. – .P. 3-24.

132. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR 1988). Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. UNSCEAR 1988 Report to the General Assembly, with annexes. – New York: United Nations sales

publishing, 1988. – 46 p.

133. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR 1993). UNSCEAR report 1993 to the General Assembly, with scientific annex. – New York: United Nations sales publication, 1994. – 90 p.

134. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR 1994). Source and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 1994 report to the General Assembly, with scientific annex. – New York: United Nations sales publication, 1994. – 92 p.

135. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR 2000). Source and Effects of Ionizing Radiation. Vol. II, Effects. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes.– New York: United Nations sales publication, 2000. – 153 p.

136. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR 2006). UNSCEAR 2006 Report. Annex A. Epidemiological Studies of Radiation and Cancer. – New York: United Nations sales publication, 2008. – 310 p.

137. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR 2010). UNSCEAR 2010 Report. Summary of low-dose radiation effects on health. New York: United Nations, 2011. – 106 p.

138. Walinder G. Carcinogenic Effects of Low Radiation Doses; An Epistemologically insoluble Problem / G. Walinder // The Effects of Low and Very Low Doses of Ionizing Radiation on Human Health. – Netherlands: Elsevier Science B.V., 2000. – P. 359-365.

139. Walinder G. Has Radiation Become a Health Hazard? / G. Walinder. – Sweden: The Swedish Nuclear Training & Safety Centre, 1995. – 130 p.

140. Xue X. A method for estimating occupational radiation doses subject to minimum detection level / X. Xue, R.E. Shore // Health Physics. – US: Lippincott Williams and Wilkins, 2003. – I. № 84(1). – P. 61-71.

## Оценка эквивалентной и эффективной дозы облучения

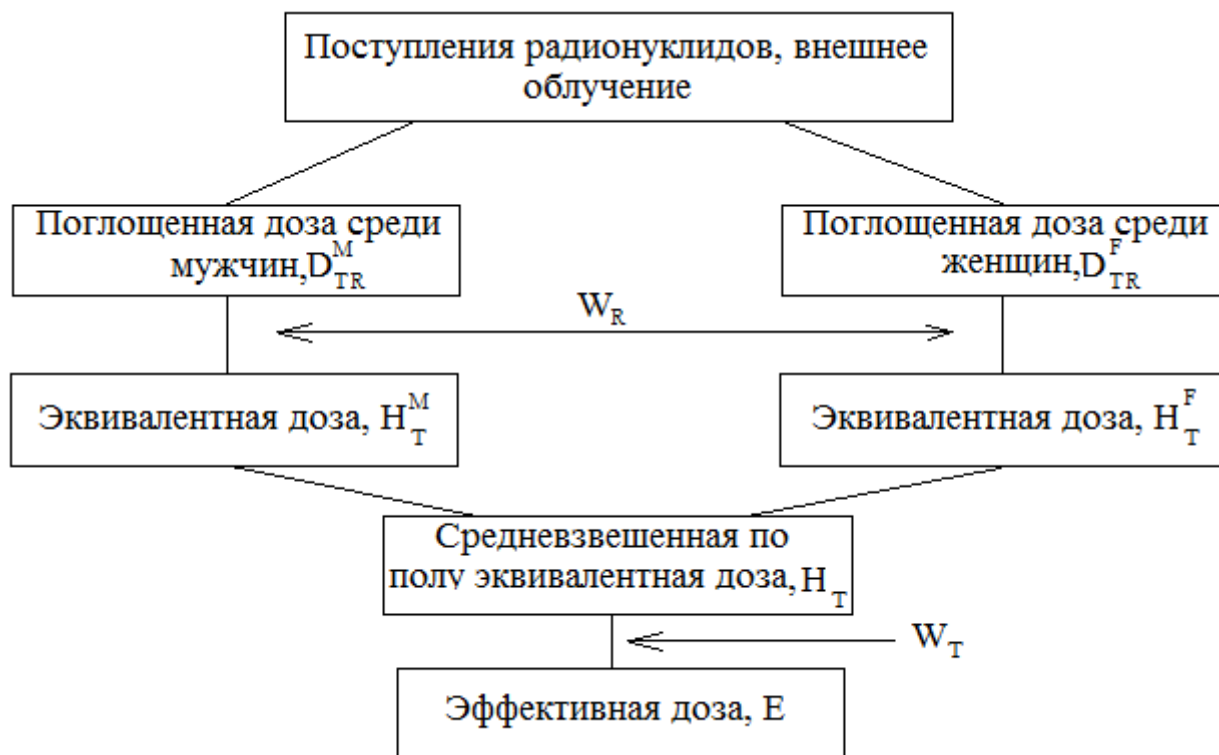


Рис П.1.1 Общая схема расчета эффективной дозы облучения и ее усреднение по полу [44]

Защитные величины используются для того, чтобы установить пределы облучения и добиться того, что выход стохастических биологических эффектов был бы ниже неприемлемых уровней, а тканевые реакции были бы полностью исключены. Определение защитных величин основано на средней поглощенной дозе ( $D_{TR}$ ) излучения  $R$  (таблица П.1.1.) в объеме данного органа или ткани  $T$  (таблица П.1.2). Излучение  $R$  задается видом и энергией излучения, падающего на поверхность тела или испускаемого инкорпорированными в организме радионуклидами. Эквивалентная доза облучения ткани  $T$  ( $H_T$ ) и эффективная доза ( $E$ ), введенная в Публикации 60 МКРЗ, определяются следующим образом:

$$H_T = \sum W_R D_{TR} \quad (П.1.1)$$

$$E = \sum W_T H_T = \sum W_T \sum W_R D_{TR},$$

где  $W_R$  – взвешивающий коэффициент облучения R-го вида (таблица П.1.1);  $W_T$  – тканевый весовой множитель для ткани или органа T (таблица П.1.2) [44].

Таблица П.1.1

## Рекомендуемые весовые множители излучения [44]

Вид излучения	Весовые множители излучения*, $W_R$
Фотоны	1
Электроны и мюоны	1
Протоны и заряженные пионы	2
Альфа-частицы, осколки деления, тяжелые ионы	20
Нейтроны	Непрерывная функция энергии нейтронов (формула П.1.2, рис. П.1.1)

\*Все значения относятся к излучению, падающему на тело, или, для внутренних источников излучения, испускаемому поглощенным радионуклидом (радионуклидами)

Расчет весового множителя излучения для нейтронов в зависимости от энергии нейтронов производится согласно формуле:

$$W_R = \begin{cases} 2,5 + 18,2e^{-\frac{(\ln(E_n))^2}{6}}, & E_n < 1\text{МэВ} \\ 5 + 17e^{-\frac{(\ln(2E_n))^2}{6}}, & 1\text{МэВ} \leq E_n \leq 50\text{МэВ}, \\ 2,5 + 3,25e^{-\frac{(\ln(0,04E_n))^2}{6}}, & E_n > 50\text{МэВ} \end{cases} \quad (П.1.2)$$

где  $E_n$  – энергия нейтронов, МэВ (Мегаэлектронвольт) [44]



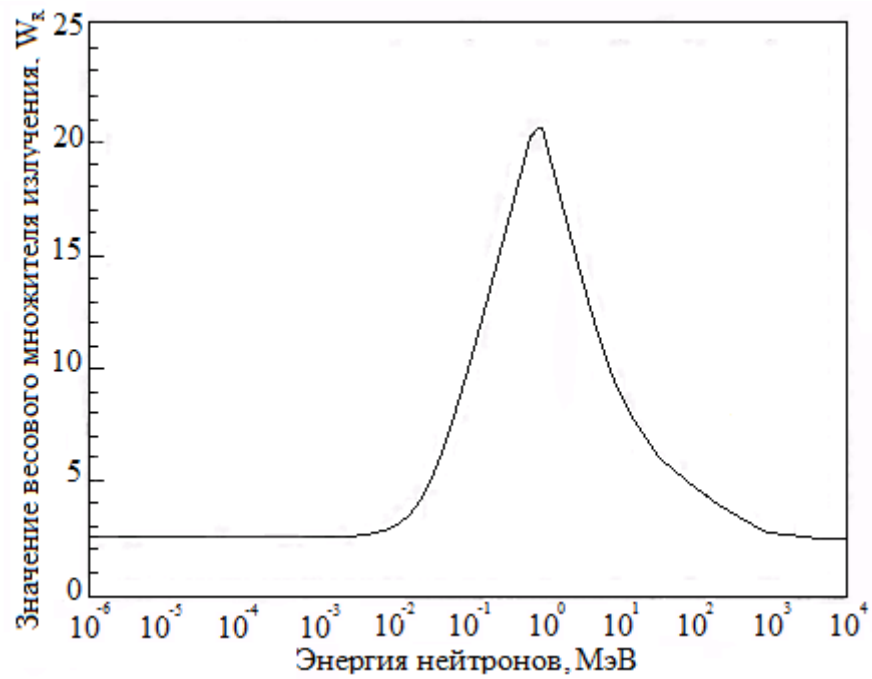


Рис. П.1.2 Весовой множитель нейтронного излучения  $W_R$  в зависимости от энергии нейтронов (по оси ординат – весовой множитель излучения  $w_R$ ; по оси абсцисс – энергия нейтронов, МэВ) [44]

Таблица П.1.2

Тканевые весовые множители, используемые при оценке эффективной дозы облучения [44]

Ткань или орган	Тканевый весовой множитель, $W_T$	Ткань или орган	Тканевый весовой множитель, $W_T$
Половые железы	0,2	Печень	0,05
Красный костный мозг	0,12	Пищевод	0,05
Толстый кишечник	0,12	Щитовидная железа	0,05
Легкие	0,12	Кожа	0,01
Желудок	0,12	Поверхность костей	0,01
Мочевой пузырь	0,05	Остальные органы	0,05
Молочные железы	0,05		

## **Рекомендации МКРЗ по радиационной защите и нормы радиационной безопасности в России**

Все жители земного шара подвержены воздействию ионизирующего излучения. При этом процедура облучения индивида представляет цепочку взаимосвязанных событий, в основе которого лежит источник излучения. Под источником излучения обычно понимается любой физический объект или процедура, способные создавать количественно оцениваемую дозу у человека или группы людей. Это могут быть физический источник, например, радиоактивный материал или рентгеновская установка, предприятие (больница или атомная электростанция), процедура (процедуры ядерной медицины или природный радиационный фон). В большинстве случаев, существует доминирующий источник облучения отдельного индивидуума, что делает возможным при планировании защитных мероприятий рассматривать источники облучения независимо друг от друга [44].

В свою очередь, излучение или радиоактивные материалы попадают в организм человека через элементы среды его обитания или посредством других различных путей. Обычно при расчете доз выделяют несколько путей облучения индивида: внешнее облучение от различных источников и внутреннее облучение радионуклидами, попадающими в организм из воздуха, из воды и пищи, через кожу при её загрязнении радиоактивной пылью. Облучение включает природную составляющую и техногенную (созданную ранее или создаваемую в текущее время). Источниками природной компоненты служат солнечная и космическая радиация, а также радиоактивное излучение от элементов природной среды (почв, грунтов и др.). Техногенное облучение создается распределениями искусственных радионуклидов в различном фазовом состоянии, созданными в процессе деятельности человека и размещёнными в среде его обитания.

Первоначально для практического контроля радиационного воздействия, цепочку событий, приводящих к облучению, делили на два обширных класса ситуаций: практики и вмешательства [108]. Под практикой подразумевается

деятельность человека, приводящая к увеличению облучения из-за введения новых источников, путей облучения, вовлечение в облучение новых индивидуумов, а также изменение путей облучения от уже существующих источников излучения. Примерами такой деятельности могут быть: строительство АЭС, хранилищ отработанного ядерного топлива (ОЯТ), рентгеновских кабинетов; разработка новых месторождений радиоактивных материалов; медицинское облучение пациентов; увеличение численности персонала, задействованного в топливном ядерном цикле и другие. Вмешательства, напротив, – это действия человека, приводящие к снижению суммарного облучения посредством оказания влияния на уже существующую цепь событий, приводящих к облучению. Такими действиями могут быть: удаление уже существующих источников излучения, дезактивация (очистка территории от радионуклидов), отселение жителей из загрязненных территорий и другие.

Однако позднее категория «практика» была заменена на следующие три ситуаций облучения:

- ситуации планируемого облучения, когда пуск и эксплуатация источников излучения были заранее спланированы;
- ситуации аварийного облучения, когда облучение носит непредвиденный характер, например, когда непредвиденное облучение происходит при плановой работе или в результате злонамеренных действий, требующих немедленного реагирования;
- ситуации существующего облучения, когда облучение уже происходит ко времени принятия решения об установлении над ним контроля, например, когда происходит облучение естественным фоном.

Медицинское облучение пациентов также является ситуацией планируемого облучения, однако из-за специфических характеристик оно рассматривается отдельно [44].

Каждую из описанных типов ситуаций облучения рассматривают относительно следующих категорий облучения: профессиональное облучение, облучение населения и медицинское облучение пациентов. Профессиональное

облучение подразумевает воздействие ионизирующего излучения на персонал в процессе его работы, вне зависимости от источника этого воздействия (будь это атомный реактор у работника АЭС, космическая радиация у членов экипажа реактивных самолетов или космических кораблей или рентгеновское оборудование у медицинского работника). К персоналу относятся лица, нанятые работодателем на основе полной, частичной или временной занятости, ознакомленные с профессиональными рисками и признающие свои обязанности в отношении обеспечения радиационной защиты. При этом главную ответственность за защиту персонала несет работодатель (или лицензиат, ответственный за источник), важнейшей функцией которого является обеспечение контроля над источником облучения.

Медицинское облучение подразумевает радиационное воздействие на пациентов при проведении диагностических, интервенционных или терапевтических процедур. Облучение проводится преднамеренно и приносит прямую пользу пациенту, в частности, при лечении онкологических и других заболеваний [62].

Облучение населения охватывает все виды облучения, не попадающие под категории профессионального или медицинского. Облучение зародыша и плода у беременных работниц атомной промышленности рассматривается также как облучение населения. В настоящее время, основным источником облучения населения является природная радиация, создаваемая естественными источниками, однако это не дает оснований для снижения контроля над техногенной компонентой.

Принятие решений по обеспечению радиационной безопасности профессионалов, лиц из населения и пациентов при различных ситуациях облучения (практик) базируется на основе следующих принципов:

- принцип обоснования – любое решение, изменяющее ситуацию облучения, должно приносить больше пользы, чем вреда;

- принцип оптимизации – вероятность облучения, число облучённых лиц и величина индивидуальных доз должны быть удержаны на таком низком уровне, насколько это разумно достижимо с учётом социально-экономических факторов.

Принцип обоснования, по сути, подразумевает, что при введении в эксплуатацию нового источника излучения, снижении существующего или риска потенциального облучения, общественная польза от данного мероприятия должна существенно превышать наносимый вред, а согласно принципу оптимизации, из имеющегося комплекса мероприятий необходимо осуществлять только обеспечивающие максимальное преимущество пользы над вредом. При этом стоит отметить, что в МКРЗ утверждается, что «оптимизация защиты не есть минимизация дозы», а поиск оценки, которая бы «тщательно сбалансировала вред от облучения и ресурсы, необходимые для защиты облучаемых индивидуумов» [44]. В свою очередь, для того, чтобы избежать крайне несправедливые результаты такой оптимизации, в ситуациях планируемого облучения для индивидуумов устанавливается еще один принцип защиты, ограничивающий дозы и риски за счет облучения от источника:

- принцип применения пределов дозы – суммарная доза для любого индивидуума от регулируемых источников в ситуациях планируемого облучения (кроме медицинского облучения пациентов) не должна превышать соответствующие пределы дозы, рекомендованные МКРЗ (таблица П.1.5) [44].

В ситуациях планируемого облучения ограничение дозы, которые могут получить индивидуумы от каждого источника, называется граничной дозой (предел дозы). В ситуациях аварийного или существующего облучения ориентированным на каждый источник ограничением является референтный уровень. Пределы дозы, установленные МКРЗ, не рекомендуются для отдельных пациентов, поскольку их применение может снизить эффективность диагностики и лечения, нанеся, тем самым, больше вреда, чем пользы. Поэтому, основной акцент делается на обоснование медицинских процедур, а не на оптимизацию защиты пациента, в частности на использование диагностических референтный уровней при проведении диагностических процедур. В общем виде различные

типы ограничения дозы, используемые в системе радиационной защиты в зависимости от типа ситуации и категории облучения, проиллюстрированы в таблице П.1.3.

Таблица П.1.3.

Граничные дозы и референтные уровни, используемые в системе радиационной защиты Комиссии [44]

Тип ситуации	Профессиональное облучение	Облучение населения	Медицинское облучение
Планируемое облучение	Предел дозы Граничная доза	Предел дозы Граничная доза	Диагностический референтный уровень <sup>c</sup>  Граничная доза <sup>d</sup>
Аварийное облучение	Референтный уровень <sup>a</sup>	Референтный уровень	Н.П. <sup>e</sup>
Существующее облучение	Н.П. <sup>b</sup>	Референтный уровень	Н.П. <sup>e</sup>

a – Долгосрочные работы по ликвидации последствий аварии следует рассматривать, как часть планируемого профессионального облучения. b – Облучение вследствие длительных восстановительных/реабилитационных работ или долговременной занятости на загрязнённой территории следует рассматривать, как часть планируемого профессионального облучения, даже если источник излучения является «существующим». c – Пациенты. d – Лица, обеспечивающие комфорт и уход за пациентами, и добровольцы, участвующие в исследовательских работах. e – Не применимо.

Защита во всех ситуациях облучения предполагает последовательный набор действий, осуществляемых в цикле: от измерений к анализу, от анализа к составлению или уточнению плана реагирования, составлению сметы на ресурсы и оценки потерь, от плана к действию и отчёту и снова к измерению (мониторингу ситуации). Для ситуаций планового облучения этот цикл ориентирован на конкретный источник излучения. При этом можно контролировать и источник и защиту. Аварии всегда уникальны и сопровождаются полной или частичной потерей контроля над источником и защитой. Ситуации существующего излучения сродни авариям (часто они являются их следствием), только источники взять под контроль невозможно – можно лишь выстраивать защиту. Планы реагирования должны вмещать в себя оценки ситуации, возможные сценарии облучения, их вероятности, дозы и соответствующие эффекты, социальные и экономические риски.

Установление граничных доз и референтных уровней является ключевой частью процесса оптимизации радиационной защиты. МКРЗ рекомендует

национальным регулирующим органам установить свои референтные уровни, учитывающие национальные и региональные особенности и приоритеты, однако ограничивает их максимальное значение эффективной дозой 100 мЗв в год или одноразово, считая, что большие дозы облучения ведут к резкому повышению вероятности развития рака. Дозы свыше 100 мЗв в год или одноразово могут быть обоснованы только в крайних случаях, например, в ситуациях спасения жизни людей, при предотвращении катастроф или если облучение неизбежно. Общая стратегия радиационной безопасности, рекомендованная МКРЗ, представлена в таблице П.1.5.

Таблица П.1.5

Сравнение критериев радиационной защиты в прежних и новых рекомендациях МКРЗ [44]

Категории облучения (публикация)	Рекомендации 1990г. и последующие публикации	Действующие рекомендации (публикация 103)
Ситуации планируемого облучения		
<b>Пределы индивидуальной дозы <sup>a</sup></b>		
<b>Профессиональное облучение (60, 68, 75) включая работы по ликвидации последствий аварии (96)</b>	20 мЗв/год с усреднением за период 5 лет <sup>c</sup>	20 мЗв/год с усреднением за период 5 лет <sup>c</sup>
- хрусталик глаза	150 мЗв/год <sup>b</sup>	150 мЗв/год <sup>b</sup>
- кожа	500 мЗв/год <sup>b</sup>	500 мЗв/год <sup>b</sup>
- кисти рук и ступни ног	500 мЗв/год <sup>b</sup>	500 мЗв/год <sup>b</sup>
- беременные женщин, в оставшийся срок беременности	2 мЗв на поверхность живота или 1 мЗв при поступлении радионуклидов	1 мЗв на зародыш/плод
<b>Облучение населения (60)</b>	1 мЗв/год	1 мЗв/год
- хрусталик глаза	15 мЗв/год <sup>b</sup>	15 мЗв/год <sup>b</sup>
- кожа	50 мЗв/год <sup>b</sup>	50 мЗв/год <sup>b</sup>
<b>Граничные дозы <sup>a</sup></b>		
<b>Профессиональное облучение (60)</b>	≤ 20 мЗв/год	≤ 20 мЗв/год
<b>Облучение населения (77, 81, 82)</b>		Устанавливается по выбору ниже 1 мЗв/год согласно реальной ситуации
- общий случай	-	≤ 0,3 мЗв/год
- захоронение РАО	≤ 0,3 мЗв/год	≤ 0,3 мЗв/год
- захоронение долгоживущих РАО	≤ 0,3 мЗв/год	≤ 0,3 мЗв/год
- пролонгированное облучение	< ~1 до ~ 0,3 мЗв/год <sup>e</sup>	< ~1 до ~ 0,3 мЗв/год <sup>e</sup>
- пролонгированное облучение долгоживущими радионуклидами	≤ 0,1 мЗв/год <sup>g</sup>	≤ 0,1 мЗв/год <sup>g</sup>
<b>Медицинское облучение (62, 94, 98)</b>		
-добровольцы в биомедицинских исследованиях, если социальная польза при этом:		
- мала	< 0,1 мЗв/год	< 0,1 мЗв/год
- невелика	0,1-1 мЗв	0,1-1 мЗв
- умеренна	1-10 мЗв	1-10 мЗв
- значительна	> 10 мЗв	> 10 мЗв
-при уходе и комфорте пациентов	5 мЗв на эпизод облучения	5 мЗв на эпизод облучения

Таблица П.1.5 (продолжение)

Категория облучения (публикации)	Рекомендации 1990г. и последующие публикации	Действующие рекомендации (публикация 103)
Ситуации аварийного облучения		
	Уровни вмешательства <sup>a d f</sup>	Референтные уровни <sup>a f</sup>
<b>Профессиональное облучение (60,96)</b>		
- операции по спасению жизни людей (информированные добровольцы)	Ограничений доз нет	Ограничений доз нет, если польза для людей превышает риск для спасателей
- прочие неотложные спасательные операции	~500 мЗв; ~5 Зв (кожа)	1000 или 500 мЗв
- прочие спасательные операции	...	≤ 100 мЗв
<b>Облучение населения (63,96)</b>		
- для пищевых продуктов	10 мЗв/год	
- для распределения стабильного йода	50-500 мЗв (щитовидная железа) <sup>b</sup>	
- укрытие	5-50 мЗв за 2 суток	
- временная эвакуация	50-500 мЗв за 1 неделю	
- временное переселение	100 мЗв за первый год или 1000 мЗв	
- все меры защиты, собранные в единой стратегии		При планировании обычно от 20 до 100 мЗв/год согласно ситуации
Ситуации существующего облучения		
	Уровни действия <sup>a</sup>	Референтные уровни <sup>a h</sup>
<b>Родон (65)</b>		
- в жилых помещениях	3-10 мЗв/год (200-600 Бк м <sup>-3</sup> )	<10 мЗв/год (<600 Бк м <sup>-3</sup> )
- в рабочих помещениях	3-10 мЗв/год (500-1500 Бк м <sup>-3</sup> )	<10 мЗв/год (<1500 Бк м <sup>-3</sup> )
	<b>Обобщённые референтные уровни<sup>a</sup></b>	<b>Референтные уровни<sup>c</sup></b>
<b>NORM, естественный фон, остаточная радиоактивность</b>		
В среде обитания человека (82) вмешательства:		
- малообоснованы	<~ 10 мЗв/год	От 1 до 20 мЗв/год
- могут быть обоснованы	>~ 10 мЗв/год	в зависимости от ситуации
- почти всегда обоснованы	До 100 мЗв/год	в зависимости от ситуации

a – Эффективная доза, если не указано иначе. b – Эквивалентная доза. c – при условии что эффективная доза не превысит 50 мЗв за любой год из этих 5 лет; дополнительные ограничения накладываются на профессиональное облучение беременных женщин. d – Предотвращенная доза. e – Граничная доза должна быть меньше 1 мЗв и значение не более, чем приблизительно 0,3 мЗв считается уместным. f – Уровни вмешательства устанавливаются по предотвращенной дозе для конкретных защитных мероприятий. Уровни вмешательства сохраняют свою применимость для оптимизации отдельных защитных мероприятий, в то время, как референтные уровни предназначены для оценки защиты в целом, и они оцениваются по остаточной дозе. g – Следует рассмотреть, если отсутствуют методы оценки доз для проверки соблюдения нормативов в любых возможных вариантах комбинаций доз. h – Референтные уровни предназначены для оценки стратегий защиты в целом и оцениваются по остаточной дозе.

В России в целом придерживаются рекомендаций МКРЗ по радиационной защите. В ситуации планового облучения, в условиях нормальной эксплуатации источников ионизирующего излучения пределы допустимых доз облучения в течение года привязываются к значениям индивидуального пожизненного радиационно-обусловленного риска смерти индивидуума, равным  $10^{-3}$  и  $5 \cdot 10^{-5}$  для персонала и населения соответственно. Эффективная доза профессионального



облучения для персонала не должна превышать 1000 мЗв за 50 лет трудовой деятельности и техногенного облучения для населения 70 мЗв за период жизни 70 лет. Дополнительное ограничение вводится для женщин в возрасте до 45 лет, работающих с источниками излучения, – эквивалентная доза на поверхности нижней части области живота не должна превышать 1 мЗв в месяц. На период беременности и грудного вскармливания ребенка женщины должны переводиться на работу, не связанную с источниками излучения.

Для студентов и учащихся старше 16 лет, проходящих профессиональное обучение с использованием источников излучения, годовые дозы не должны превышать 25% от значений доз, установленных для профессионалов в таблице П.1.5.

При проведении обоснованных медицинских рентгенорадиологических обследований в связи с профессиональной деятельностью или в рамках медико-юридических процедур, а также рентгенорадиологических профилактических медицинских и научных исследований практически здоровых лиц, не получающих прямой пользы для своего здоровья от процедур, связанных с облучением, годовая эффективная доза не должна превышать 1 мЗв [46].

В ситуации существующего облучения, эффективная доза, получаемая от природных источников излучения рабочими (в том числе и профессионалами), не должна превышать 5 мЗв/год при условии продолжительности работы 2000 ч/год и средней скорости дыхания 1,2 м<sup>3</sup>/ч. Аналогичный предел дозы устанавливается и на воздействие космического излучения на экипажи самолетов.

В ситуации аварийного облучения, к планируемому повышенному облучению в эффективной дозе свыше 100 мЗв/год (эквивалентной дозе свыше 1000 мЗв на поверхность кожи и 300 мЗв на хрусталик глаза), в случае спасения жизни людей, допускаются мужчины-профессионалы, как правило, старше 30 лет, при их добровольном письменном согласии после информирования о возможных дозах облучения и риске для здоровья. Повышенное облучение не допускается для работников, ранее уже облучаемых эффективной дозой свыше 200 мЗв/год (или эквивалентной дозой на поверхность кожи 2000 мЗв и на хрусталик глаза 600

мЗв), а также для лиц, имеющих медицинское противопоказание для работы с источниками излучения. Лица, подвергшиеся облучению в эффективной дозе свыше 100 мЗв/год, при дальнейшей работе не должны подвергаться облучению в дозе свыше 20 мЗв/год. Облученные эффективной дозой свыше 200 мЗв/год должны немедленно выводиться из зоны облучения и направляться на медицинское обследование. К последующей работе с источниками ионизирующего излучения эти лица допускаются только с учетом их согласия по решению компетентной медицинской комиссии. Лица из населения, не попадающие под категорию персонал, привлекаемые для проведения аварийных и спасательных работ, должны быть оформлены и допущены к работе как профессионалы.

Уровни вмешательства для принятия решения о временном отселении населения с территории составляют более 30 мЗв в месяц для начала эвакуации и менее 10 мЗв в месяц для ее окончания. Если прогнозируется, что накопленная доза за месяц будет находиться выше указанных пределов в течение года, то следует решать вопрос об отселении населения на постоянной основе [46].

Принятие решения о проведении соответствующего рискоснижающего мероприятия при крупномасштабной радиационной аварии на ранних этапах осуществляется на основе сравнения предотвращенной защитным мероприятием дозы облучения населения с уровнями А и Б, приведенными в таблице П.1.6. При этом если уровень облучения, предотвращаемого мерой вмешательства, не превосходит уровень А, то нет необходимости в ее проведении; если находится в диапазоне от уровня А до Б, то решение о ее проведении принимается по принципам обоснованности и оптимизации с учетом местных условий; если превосходит уровень Б, то необходимо выполнение соответствующей меры защиты, даже если это нарушит хозяйственное и социальное функционирование данной территории.

На поздних стадиях радиационной аварии, повлекшей за собой загрязнение обширных территорий долгоживущими радионуклидами, решения о проведении

рискоснижающих мероприятий принимаются на основе анализа сложившихся социально-экономических условий на данной территории.

Для экономического обоснования расходов на радиационную защиту при реализации принципа оптимизации принимается, что облучение в коллективной эффективной дозе в 1 чел.-Зв приводит к потенциальному ущербу, равному потере примерно 1 чел.-года жизни населения. Величина денежного эквивалента потери 1 чел.-года жизни устанавливается отдельными документами федерального уровня в размере не менее 1 годового душевого национального дохода [46].

Таблица П.1.6

Критерии для принятия неотложных решений в начальном периоде радиационной аварии [46]

Меры защиты	Предотвращаемая доза за первые 10 суток, мГр			
	На все тело		Щитовидная железа, легкие, кожа	
	Уровень А	Уровень Б	Уровень А	Уровень Б
Укрытие	5	50	50	500
Йодная профилактика:				
	- взрослые	-	250*	2500*
- дети	-	-	100*	1000*
Эвакуация	50	500	500	5000
	Предотвращенная эффективная доза на все тело, мЗв			
	Уровень А		Уровень Б	
Ограничение потребления пищевых продуктов и питьевой воды	5 за первый год и 1 в последующие годы		50 за первый год и 10 в последующие годы	
Отселение	50 за первый год		500 за первый год	
	1000 за все время отселения			

\*только для щитовидной железы

**Модели оценки радиационных рисков [130,136]**

Во всех представленных EAR моделях размерность 10000 чел.-лет<sup>-1</sup>

1) Модели оценки роста вероятности **смерти от солидных раков**:

$$ERR = 601 \cdot D \cdot \exp(0.6s + 0.99 \ln(a - e) - 2.6 \ln(a))$$

$$ERR = 2,3 \cdot D \cdot \exp(0.73s - 0,62 \ln(e))$$

$$ERR = (408 \cdot D + 119 \cdot D^2) \cdot \exp(0.66s + 0.99 \ln(a - e) - 2,6 \ln(a))$$

$$EAR = 1.1 \cdot 10^{-8} \cdot D \cdot \exp(0.66 \ln(a - e) + 2.36 \ln(a))$$

$$EAR = (7.75 \cdot 10^{-9} \cdot D + 3.1 \cdot 10^{-9} \cdot D^2) \cdot \exp(0.66 \ln(a - e) + 2.34 \ln(a))$$

где  $D$  – эквивалентная доза облучения всего тела (Зв.);  $s$  – пол ( $s=0$  для мужчин,  $s=1$  для женщин);  $a$  – предполагаемый возраст дожития,  $e$  – возраст на момент облучения.

$$ERR = 0.42 \cdot D \cdot (1 + 2.1s) \cdot \exp(-0.029(e - 30) - 0.86 \ln(\frac{a}{70}))$$

где  $s$  – пол ( $s=-1$  для мужчин,  $s=1$  для женщин).

2) Модели оценки роста вероятности **смерти от лейкемии**:

$$ERR = 1013 \cdot D^2 \cdot \exp(-1.56 \ln(a))$$

$$ERR = (864.6 \cdot D + 1181 \cdot D^2) \cdot \exp(-1.65 \ln(a))$$

$$EAR = 1.45 \cdot 10^{-3} \cdot D^2 \cdot \exp(-0.52 \cdot s - 0.67 \cdot \ln(a - e))$$

$$EAR = (7.5 \cdot 10^{-4} \cdot D + 7.8 \cdot 10^{-4} \cdot D^2) \cdot \exp(-0.53s - 0.6 \ln(a - e))$$

где  $s$  – пол ( $s=0$  для мужчин,  $s=1$  для женщин).

3) Модели оценки роста вероятности **заболевания раком пищевода**:

$$ERR = 0.53 \cdot D$$

$$EAR = 1.452 \cdot 10^{-5} \cdot D$$

Модели оценки роста вероятности **смерти от рака пищевода**:

$$ERR = 0.6 \cdot D \cdot (1 + 4.3s) \cdot \exp(0.035(e - 30) - 3.7 \ln(\frac{a}{70}))$$

где  $s$  – пол ( $s=-1$  для мужчин,  $s=1$  для женщин).

4) Модели оценки роста вероятности **заболевания раком желудка:**

$$ERR = 4025 \cdot D \cdot \exp(-2.253 \ln(a))$$

$$EAR = 3.97 \cdot 10^{-7} \cdot D \cdot \exp(1.8 \cdot \ln(a))$$

Модели оценки роста вероятности **смерти от рака желудка:**

$$ERR = 0.33 \cdot D \cdot (1 + 3.7s) \cdot \exp(-0.018(e - 30) - 0.74 \ln(\frac{a}{70}))$$

где  $s$  – пол ( $s=-1$  для мужчин,  $s=1$  для женщин).

5) Модели оценки роста вероятности **заболевания раком кишечника:**

$$ERR = 1.48 \cdot 10^6 \cdot D \cdot \exp(-3.5 \ln(a))$$

$$EAR = 2.9 \cdot 10^{-9} \cdot D \cdot \exp(3.2 \cdot \ln(a - e))$$

Модели оценки роста вероятности **смерти от рака кишечника:**

$$ERR = 0.34 \cdot D \cdot (1 + 1.4s) \cdot \exp(-0.003(e - 30) - 5.8 \ln(\frac{a}{70}))$$

где  $s$  – пол ( $s=-1$  для мужчин,  $s=1$  для женщин).

6) Модели оценки роста вероятности **заболевания раком печени:**

$$ERR = 0.4 \cdot D$$

$$EAR = 10^{-10} \cdot D \cdot \exp(3.5 \cdot \ln(a))$$

Модели оценки роста вероятности **смерти от рака печени:**

$$ERR = 0.38 \cdot D \cdot (1 + 1.6s) \cdot \exp(-0.008(e - 30) - 0.02 \ln(\frac{a}{70}))$$

где  $s$  – пол ( $s=-1$  для мужчин,  $s=1$  для женщин).

7) Модели оценки роста вероятности **заболевания раком легкого:**

$$ERR = 0.3 \cdot D \cdot \exp(1.5s)$$

$$EAR = 10^{-11} \cdot D \cdot \exp(0.4s + 4.2 \cdot \ln(a))$$

где  $s$  – пол ( $s=0$  для мужчин,  $s=1$  для женщин).

Модели оценки роста вероятности **смерти от рака легкого:**

$$ERR = 0.75 \cdot D \cdot (1 + 2.7s) \cdot \exp(-0.007(e - 30) - 0.04 \ln(\frac{a}{70}))$$

где  $s$  – пол ( $s=-1$  для мужчин,  $s=1$  для женщин).

8) Модели оценки роста вероятности **заболевания костным раком:**

$$ERR = 6,9 \cdot 10^7 \cdot D^2 \cdot \exp(-4.5 \ln(a))$$

$$EAR = 9.3 \cdot 10^{-6} \cdot D^2$$

9) Модели оценки роста вероятности **заболевания раком кожи (кроме меланомы):**

$$ERR = 2615 \cdot D^2 \cdot \exp(-0.27D + 3.2 \ln(a - e) - 4.6 \ln(a))$$

$$EAR = 5.2 \cdot 10^{-9} D^2 \cdot \exp(-0.27D + 2.9 \ln(a - e))$$

10) Модели оценки роста вероятности **заболевания раком груди у женщин:**

$$ERR = 1.5 \cdot 10^4 \cdot D \cdot \exp(-2.3 \ln(a))$$

$$EAR = 1.9 \cdot 10^{-5} D \cdot \exp(1.1 \ln(a - e))$$

Модели оценки роста вероятности **смерти от рака груди у женщин:**

$$ERR = 0.9 \cdot D \cdot \exp(-0.045(e - 30) - 0.17 \ln(\frac{a}{70}))$$

11) Модели оценки роста вероятности **заболевания раком мочевого пузыря:**

$$ERR = 0,9 \cdot D$$

$$EAR = 6 \cdot 10^{-15} D \cdot \exp(5,75 \ln(a))$$

Модели оценки роста вероятности **смерти от рака мочевого пузыря:**

$$ERR = 1.19 \cdot D \cdot (1 + 1,7s) \cdot \exp(-0.002(e - 30) + 0.49 \ln(\frac{a}{70}))$$

где  $s$  – пол ( $s=-1$  для мужчин,  $s=1$  для женщин).

12) Модели оценки роста вероятности **заболевания раком мозга и ЦНС:**

$$ERR = 7,4 \cdot D \cdot \exp(-0.99 \ln(e))$$

$$EAR = 4.9 \cdot 10^{-5} D$$

13) Модели оценки роста вероятности **заболевания раком щитовидной железы:**

$$ERR = 3,8 \cdot 10^4 \cdot D \cdot \exp(-0.44 \ln(e) - 2.2 \ln(a))$$

$$EAR = 2.6 \cdot 10^{-4} D \cdot \exp(1.4s - 0,39 \ln(e))$$

где  $s$  – пол ( $s=0$  для мужчин,  $s=1$  для женщин).

14) Модели оценки роста вероятности **смерти от рака желчного пузыря:**

$$ERR = 0.48 \cdot D \cdot (1 + 0,42s) \cdot \exp(-0.027(e - 30) - 1.9 \ln(\frac{a}{70}))$$

где  $s$  – пол ( $s=-1$  для мужчин,  $s=1$  для женщин).

15) Модели оценки роста вероятности **смерти от рака яичника у женщин:**

$$ERR = 0.2 \cdot D \cdot \exp(-0.022(e - 30) - 4,1 \ln(\frac{a}{70}))$$

16) Модели оценки роста вероятности **заболевания другими видами раков:**

$$ERR = 143 \cdot D \cdot \exp(1,6 \ln(a - e) - 2.9 \ln(a))$$

$$EAR = 2.2 \cdot 10^{-7} \cdot D \cdot \exp(2.2 \ln(a - e))$$

## Приложение к главе 2

### Приложение 2.1

#### Исходные данные о когорте выживших после атомной бомбардировки в Хиросиме и Нагасаки в 1945 г.[122]

#### Таблица П.2.1

Общая численность населения в когорте выживших в зависимости от возраста и дозы облучения (чел.)

Дозовая группа \ Возрастная группа (на момент облучения)	Возрастная группа (на момент облучения)														
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-55	55-60	60-65	65-70	70+
0-5	4415	3411	4227	3844	2484	2346	2454	2819	2964	2955	2253	1770	1259	763	545
5-20	2036	1449	1360	1292	841	873	1014	1042	1098	1092	838	642	456	304	218
20-40	833	566	622	536	423	389	440	482	492	477	378	319	213	130	111
40-60	510	339	500	414	265	260	303	325	306	306	241	187	124	76	47
60-80	294	218	302	282	178	166	170	200	225	221	155	129	75	57	38
80-100	211	141	268	164	125	140	141	176	172	196	113	98	76	43	18
100-125	240	196	189	163	116	138	146	137	156	165	118	84	62	39	26
125-150	175	114	119	133	91	95	103	141	137	129	88	77	58	41	22
150-175	175	129	144	107	80	102	102	133	133	117	84	68	43	33	10
175-200	146	85	77	106	56	52	58	70	96	84	62	55	28	26	15
200-250	192	130	117	154	108	90	120	117	131	135	91	73	58	30	24
250-300	158	91	137	148	86	91	129	119	107	122	77	66	43	24	19
300-500	381	256	293	340	232	220	229	295	293	276	205	150	107	53	39
500-750	187	143	234	282	165	144	137	173	195	175	134	100	58	28	21
750-1000	104	86	138	220	106	88	56	92	115	79	66	46	32	14	6
1000-1250	77	57	71	129	53	43	56	65	66	47	52	22	10	6	4
1250-1500	51	33	56	76	48	37	41	43	41	34	31	9	10	5	1
1500-1750	24	22	36	47	24	22	20	20	27	28	12	11	9	3	0
1750-2000	25	14	20	21	18	13	12	11	17	19	4	6	1	2	1
2000-2500	31	23	66	68	37	22	23	29	25	29	18	13	10	3	3
2500-3000	25	21	23	37	13	11	12	15	11	11	10	5	8	1	1
3000+	12	7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Таблица П.2.2

Средние дозы облучения в каждой возрастной и дозовой группах в когорте выживших (мГр.)

Возрастная группа \ Дозовая группа	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-55	55-60	60-65	65-70	70+
0-5	0,98	1,00	0,96	0,96	0,98	0,97	0,95	0,93	1,00	0,95	1,00	0,97	0,98	0,88	0,77
5-20	10,81	10,78	10,43	10,45	10,61	10,54	10,53	10,54	10,46	10,37	10,44	10,65	10,61	10,56	10,36
20-40	28,91	28,72	29,24	28,88	28,71	28,80	28,99	28,86	28,71	28,51	28,68	28,14	28,84	27,60	29,25
40-60	49,41	49,02	48,59	48,80	49,00	49,33	48,78	48,84	49,37	50,01	49,06	49,02	49,27	49,16	51,19
60-80	69,89	68,84	69,83	68,92	68,97	68,65	68,95	68,91	69,28	68,73	69,05	68,97	68,71	68,56	71,83
80-100	90,07	89,71	91,84	89,33	89,81	90,40	89,40	89,72	90,52	89,33	88,90	90,08	90,09	90,02	90,49
100-125	112,41	111,66	111,93	111,51	113,04	112,39	111,14	112,06	112,39	111,62	112,67	110,68	111,83	111,22	114,09
125-150	137,92	137,89	137,55	136,54	137,63	137,52	137,24	136,12	136,67	137,47	136,74	137,06	138,03	136,48	135,30
150-175	162,15	162,66	162,28	161,14	162,21	161,85	161,35	162,50	161,66	161,90	161,82	162,86	164,20	162,40	163,75
175-200	187,65	186,06	185,54	185,93	189,64	187,07	187,31	186,32	187,01	188,53	185,47	185,73	187,38	187,77	187,59
200-250	223,34	222,71	225,38	224,35	224,17	223,24	224,96	226,24	225,43	224,58	223,56	221,71	224,65	224,46	215,60
250-300	275,59	273,46	275,51	274,82	275,10	275,47	276,35	274,71	276,06	275,58	274,60	274,30	277,15	274,62	266,06
300-500	386,36	383,79	384,46	392,56	390,73	384,87	385,20	392,40	391,30	387,08	387,94	408,07	394,19	363,99	379,53
500-750	607,85	611,63	628,31	624,59	602,03	614,47	611,37	605,75	617,62	618,65	592,09	596,53	581,85	643,03	616,38
750-1000	850,61	850,77	861,81	864,74	864,28	861,01	851,75	865,84	860,34	862,33	872,93	854,75	847,56	808,31	877,19
1000-1250	1115,26	1127,80	1115,32	1103,96	1087,13	1107,65	1097,92	1124,09	1110,95	1128,37	1117,99	1113,99	1122,40	1179,39	1085,22
1250-1500	1355,47	1360,95	1359,30	1366,47	1392,38	1351,53	1363,44	1355,82	1370,10	1365,16	1370,17	1395,81	1373,93	1352,18	1372,00
1500-1750	1622,39	1609,61	1617,14	1609,98	1610,40	1584,80	1610,44	1605,41	1635,42	1635,53	1622,34	1613,61	1622,92	1547,15	-
1750-2000	1867,35	1875,07	1847,65	1833,36	1880,38	1887,52	1845,72	1842,81	1880,69	1872,53	1788,76	1885,68	1854,00	1905,57	1890,00
2000-2500	2217,15	2195,86	2249,19	2242,10	2239,19	2280,56	2252,06	2283,07	2276,07	2282,54	2270,93	2298,49	2231,44	2292,19	2263,86
2500-3000	2771,05	2805,98	2614,51	2657,38	2631,91	2642,32	2669,61	2626,15	2622,21	2634,20	2594,09	2682,56	2638,48	2558,00	2851,00
3000+	3276,34	3171,72	3058,30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Таблица П.2.3

Число умерших от солидных раков в каждой возрастной и дозовой группах в когорте выживших (чел.)

Возрастная группа \ Дозовая группа	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-55	55-60	60-65	65-70	70+
0-5	120	159	336	387	292	379	493	570	545	534	363	238	127	54	24
5-20	55	68	116	137	81	145	188	231	214	186	133	80	54	20	11
20-40	33	24	67	63	51	54	79	90	107	72	51	47	22	5	4
40-60	12	17	56	41	26	38	58	68	68	63	42	31	11	6	2
60-80	6	20	28	30	19	29	31	44	38	48	23	20	11	4	2
80-100	8	7	30	16	13	16	26	39	41	36	18	11	11	1	0
100-125	8	6	20	16	15	16	27	25	21	30	23	13	9	1	0
125-150	8	6	16	16	11	21	26	27	33	25	11	16	6	5	0
150-175	6	7	14	9	9	16	22	23	20	20	16	9	7	5	0
175-200	3	5	2	14	9	18	12	14	31	23	7	6	1	3	1
200-250	7	8	13	18	18	17	18	24	25	24	13	11	6	0	1
250-300	6	6	14	22	14	26	21	30	25	24	13	6	5	1	1
300-500	18	8	29	37	33	42	33	66	52	55	41	20	12	3	4
500-750	6	10	18	30	24	24	22	42	48	23	22	18	6	4	1
750-1000	6	9	13	35	17	27	6	30	32	21	11	4	5	4	1
1000-1250	6	10	11	18	15	8	13	23	13	6	12	5	0	0	0
1250-1500	6	6	6	13	11	9	9	12	6	8	4	0	1	1	0
1500-1750	2	5	9	14	7	9	5	7	7	6	5	4	0	2	0
1750-2000	3	0	4	7	3	5	2	2	5	7	0	1	0	0	0
2000-2500	6	3	12	12	14	5	7	4	9	5	0	2	1	1	0
2500-3000	2	6	6	5	1	1	3	6	4	4	0	2	1	0	0
3000+	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Социально-демографические показатели и фоновая онкологическая  
смертность жителей России**

Таблица П.2.4

Смертность различных половозрастных групп населения в России от  
злокачественных новообразований по состоянию на 2012 г. (грубый показатель на  
100 тыс. чел.) [23]

Возрастная группа	Мужчины		Женщины	
	Все раки, кроме лейкемии (С00-С90)	Лейкемия (С91-С95)	Все раки, кроме лейкемии (С00-С90)	Лейкемия (С91-С95)
0-4	3,02	1,32	9,99	5,12
5-9	2,68	1,33	5,84	3,55
10-14	2,36	1,06	5,88	2,47
15-19	4,13	1,4	11,65	1,93
20-24	5,2	1,19	21,31	1,26
25-29	8,67	1,33	43,93	1,69
30-34	15,69	1,59	82,7	1,57
35-39	28,07	1,61	135,69	2,56
40-44	55,89	2	215,66	3,32
45-49	120,65	2,81	315,78	4,92
50-54	251,22	4,7	448,09	6,48
55-59	480,38	9,04	589,21	9,51
60-64	759,54	13,82	786,04	13,12
65-69	1007,15	19,78	971,46	19,1
70-74	1340,94	27,69	1069,46	21,56
75-79	1499,99	32,64	1170,06	22,43
80-84	1557,16	33,51	1087,47	20,93
85+	1534,09	33,07	977,48	14,39

Показатели дожития среди мужчин и женщин в России от возраста  $a-1$  до  
возраста  $a$  [28]

Возраст $a$	Мужчины	Женщины	Возраст $a$	Мужчины	Женщины
1	0,9992	0,9997	36	0,9931	0,9979
2	0,9992	0,9997	37	0,9927	0,9978
3	0,9991	0,9997	38	0,9922	0,9976
4	0,9991	0,9996	39	0,9917	0,9975
5	0,9990	0,9996	40	0,9912	0,9974
6	0,9990	0,9996	41	0,9906	0,9972
7	0,9989	0,9996	42	0,9900	0,9971
8	0,9988	0,9996	43	0,9894	0,9969
9	0,9987	0,9995	44	0,9887	0,9967
10	0,9987	0,9995	45	0,9880	0,9965
11	0,9986	0,9995	46	0,9872	0,9963
12	0,9985	0,9994	47	0,9863	0,9961
13	0,9984	0,9994	48	0,9855	0,9959
14	0,9983	0,9994	49	0,9845	0,9957
15	0,9982	0,9993	50	0,9835	0,9954
16	0,9980	0,9993	51	0,9825	0,9955
17	0,9979	0,9993	52	0,9813	0,9950
18	0,9978	0,9992	53	0,9801	0,9946
19	0,9976	0,9992	54	0,9788	0,9941
20	0,9975	0,9991	55	0,9775	0,9935
21	0,9973	0,9991	56	0,9760	0,9929
22	0,9971	0,9990	57	0,9744	0,9923
23	0,9970	0,9990	58	0,9728	0,9916
24	0,9968	0,9989	59	0,9710	0,9908
25	0,9966	0,9989	60	0,9692	0,9899
26	0,9963	0,9988	61	0,9672	0,9890
27	0,9961	0,9987	62	0,9650	0,9879
28	0,9958	0,9986	63	0,9628	0,9868
29	0,9956	0,9986	64	0,9604	0,9856
30	0,9953	0,9985	65	0,9578	0,9843
31	0,9950	0,9984	66	0,9551	0,9828
32	0,9947	0,9983	67	0,9522	0,9812
33	0,9943	0,9982	68	0,9491	0,9795
34	0,9940	0,9981	69	0,9458	0,9776
35	0,9936	0,9980	70	0,9423	0,9755

Таблица П.2.5 (продолжение)

Возраст а	Мужчины	Женщины	Возраст а	Мужчины	Женщины
71	0,9386	0,9732	86	0,8427	0,8717
72	0,9346	0,9707	87	0,8325	0,8610
73	0,9303	0,9680	88	0,8217	0,8493
74	0,9258	0,9650	89	0,8102	0,8367
75	0,9210	0,9618	90	0,7979	0,8230
76	0,9159	0,9426	91	0,7848	0,8082
77	0,9105	0,9378	92	0,7709	0,7921
78	0,9047	0,9326	93	0,7561	0,7747
79	0,8986	0,9269	94	0,7403	0,7559
80	0,8920	0,9208	95	0,7235	0,7354
81	0,8850	0,9142	96	0,7056	0,7133
82	0,8776	0,9070	97	0,6866	0,6893
83	0,8697	0,8992	98	0,6663	0,6633
84	0,8612	0,8908	99	0,6447	0,6351
85	0,8522	0,8816	100	0,6218	0,6045

Таблица П.2.6

## Половозрастная структура жителей России в 2012 году [79]

Возрастная группа	Всего	Мужчины		Женщины	
		Абсолютное значение	В процентах от всего населения	Абсолютное значение	В процентах от всего населения
0-9	16127810	8266767	5,8%	7861043	5,5%
10-19	13841444	7084769	4,9%	6756675	4,7%
20-29	23404395	11846707	8,3%	11557688	8,1%
30-39	21804841	10754631	7,5%	11050210	7,7%
40-49	19108043	9169155	6,4%	9938888	6,9%
50-59	21818383	9779820	6,8%	12038563	8,4%
60-69	13143410	5304560	3,7%	7838850	5,5%
70+	14098733	4147118	2,9%	9951615	6,9%
Все население	143347059	66353527	46,3%	76993532	53,7%

## Общее руководство по устранению инцидентов с выбросом радиации [102]

## Факторы, влияющие на приоритеты реабилитации

Фактор	Примечания
Размер территории	Влияет на скорость реализации стратегии реализации, последствия ее реализации и сроки ее выполнения. Деактивация небольших территорий может быть проще по сравнению с обширными районами и для них возможно применение большего числа мер.
Расположение	Расположение объекта радиологической чрезвычайной ситуации может оказать влияние на приоритеты, что может быть связано с туризмом, политической чувствительностью, экономической стабильностью, или критически важными объектами и инфраструктурой.
Число пострадавших	В случае, если пострадало большое количество людей, воздействие на здоровье населения может быть значительным даже в том случае, если индивидуальные дозы невысокие. Аналогично, реализация контрмер приведет к значительному нарушению хозяйственной деятельности. Возможно давление, связанное с необходимостью обозначить приоритетным реабилитацию жилых районов с высокой плотностью населения или районов работы большого числа людей по сравнению с сельскими районами с низкой плотностью населения.
Живут ли люди на территории/были эвакуированы на стадии реагирования?	<p>Приоритет может быть отдан тем районам, где все еще находится население. Затем приоритеты в самих жилых зонах могут быть установлены на основе прогнозируемых доз. В случае если не проводится временное переселение населения на период выполнения реабилитационных работ, это может оказать влияние на выбор мер и приоритетов на этой территории.</p> <p>В случае, если население было эвакуировано, можно продлить время их эвакуации с загрязненной территории. Это также может оказать влияние на приоритеты реабилитации, например, более высокий приоритет отдается районам, где люди все еще живут и работают.</p>

Таблица П.3.1 (продолжение)

Тип радиологической чрезвычайной ситуации/инцидента	<p>Инциденты, связанные с некоторыми видами радиоактивных веществ, например, с плутонием, могут вызвать повышенные опасения среди населения на пострадавшей и соседних территориях.</p> <p>Это может оказать влияние на приоритеты, например, необходимость удаления загрязненных материалов их окружающей среды.</p> <p>Инциденты, связанные с террористической деятельностью также могут восприниматься населением иначе, что также влияет на приоритеты в ходе реабилитации. Например, если отсутствует очевидно "виновная сторона", уровень ожидаемой реабилитации может быть другим в отличие от случая когда виновником ситуации является конкретная организация/кампания, что приводит к высоким ожиданиям от реабилитационных мер.</p>
Необходимость показать продолжение "нормальной жизни"	<p>Отказ от закрытия школ и других общественных зданий и разрешение свободного перемещения людей в привычной для них обстановке с небольшими ограничениями или вообще без них, может оказывать влияние на приоритеты реабилитации.</p>
Экономическая стабильность – необходимость в функционировании организаций и инфраструктуры	<p>Приоритеты могут быть связаны с коммерческими зданиями, магазинами, дорогами, итд, что обусловлено необходимостью поддерживать их функционирование, чтобы предотвратить чрезмерный ущерб для экономики региона и чтобы сохранить инфраструктуру, необходимую для жителей района.</p>

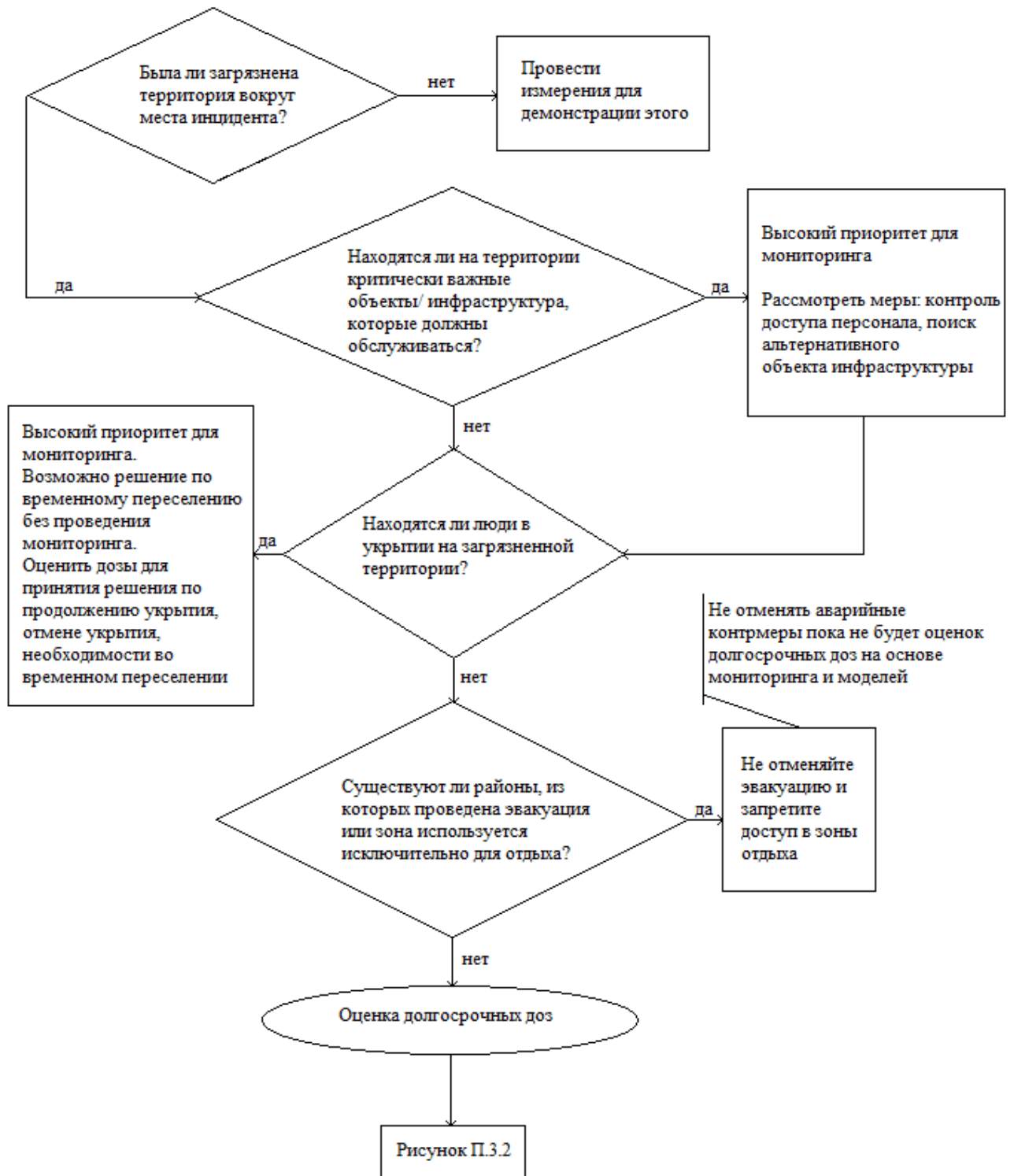


Рис. П.3.1 Дерево решений для разработки стратегии реабилитации



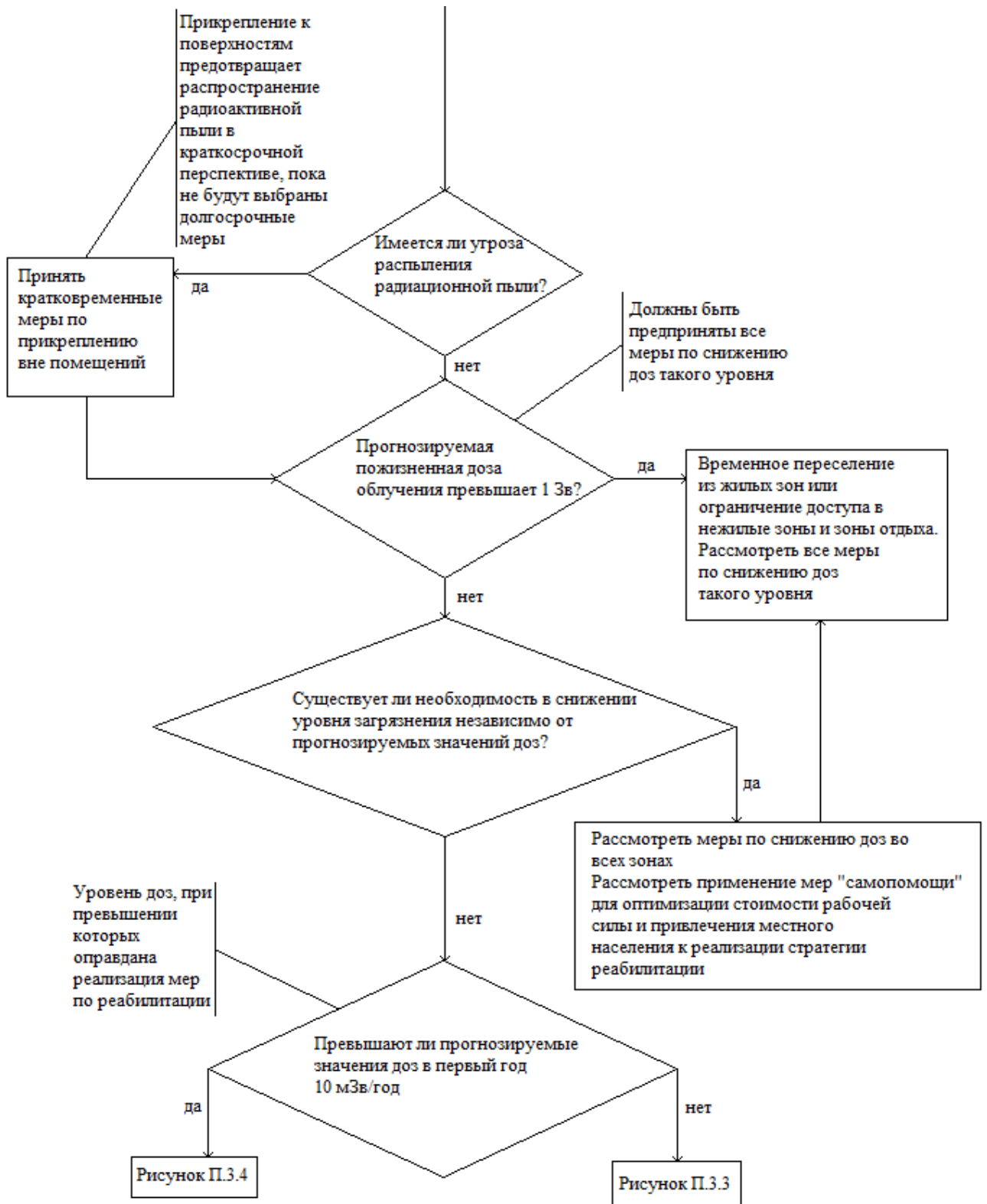


Рис. П.3.2 Дерево решений для разработки стратегии реабилитации после долгосрочной оценки доз

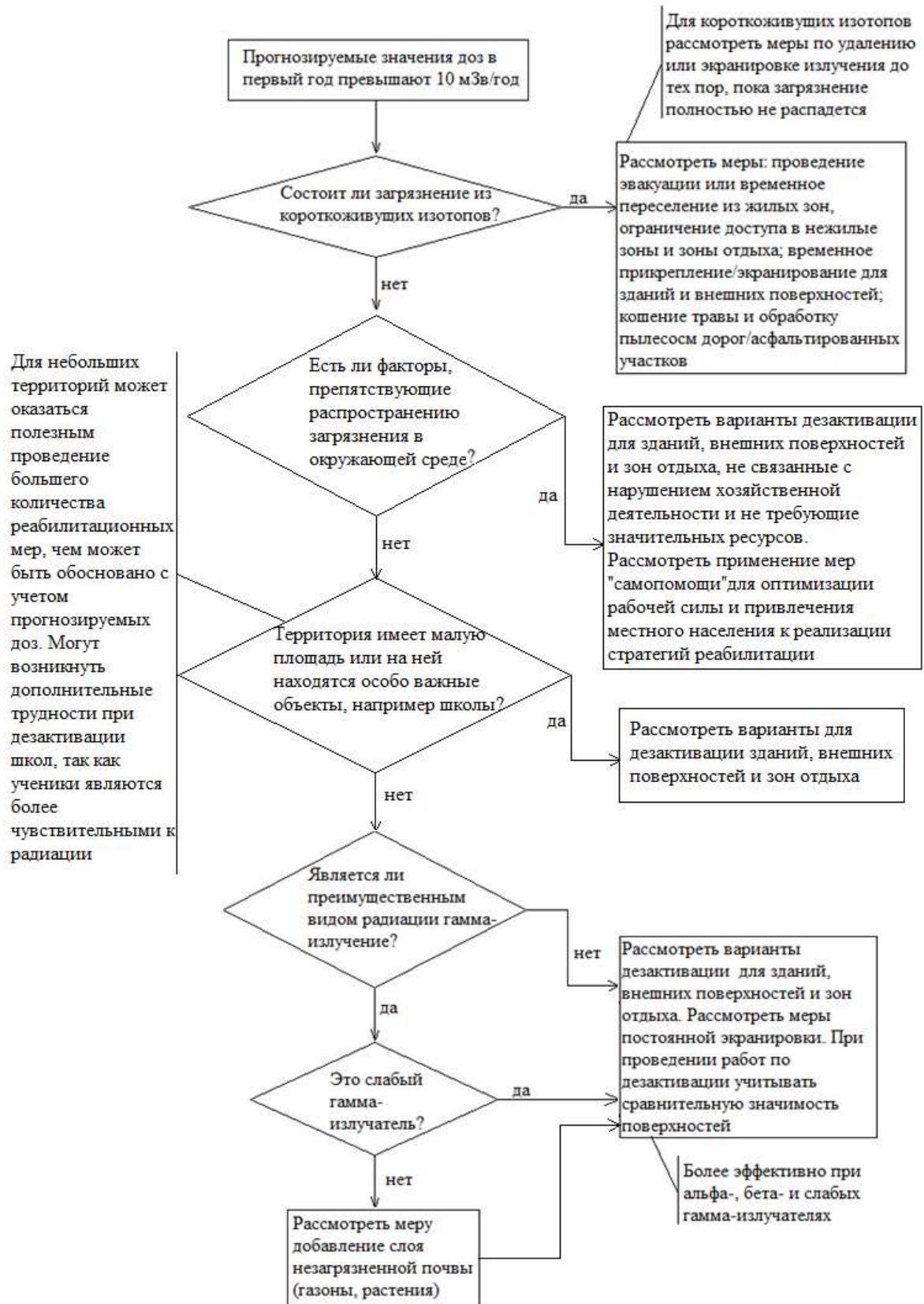


Рис.П.3.3 Дерево решений для разработки стратегий реабилитации при прогнозируемых уровнях доз менее 10 мЗв/год в первый год после инцидента

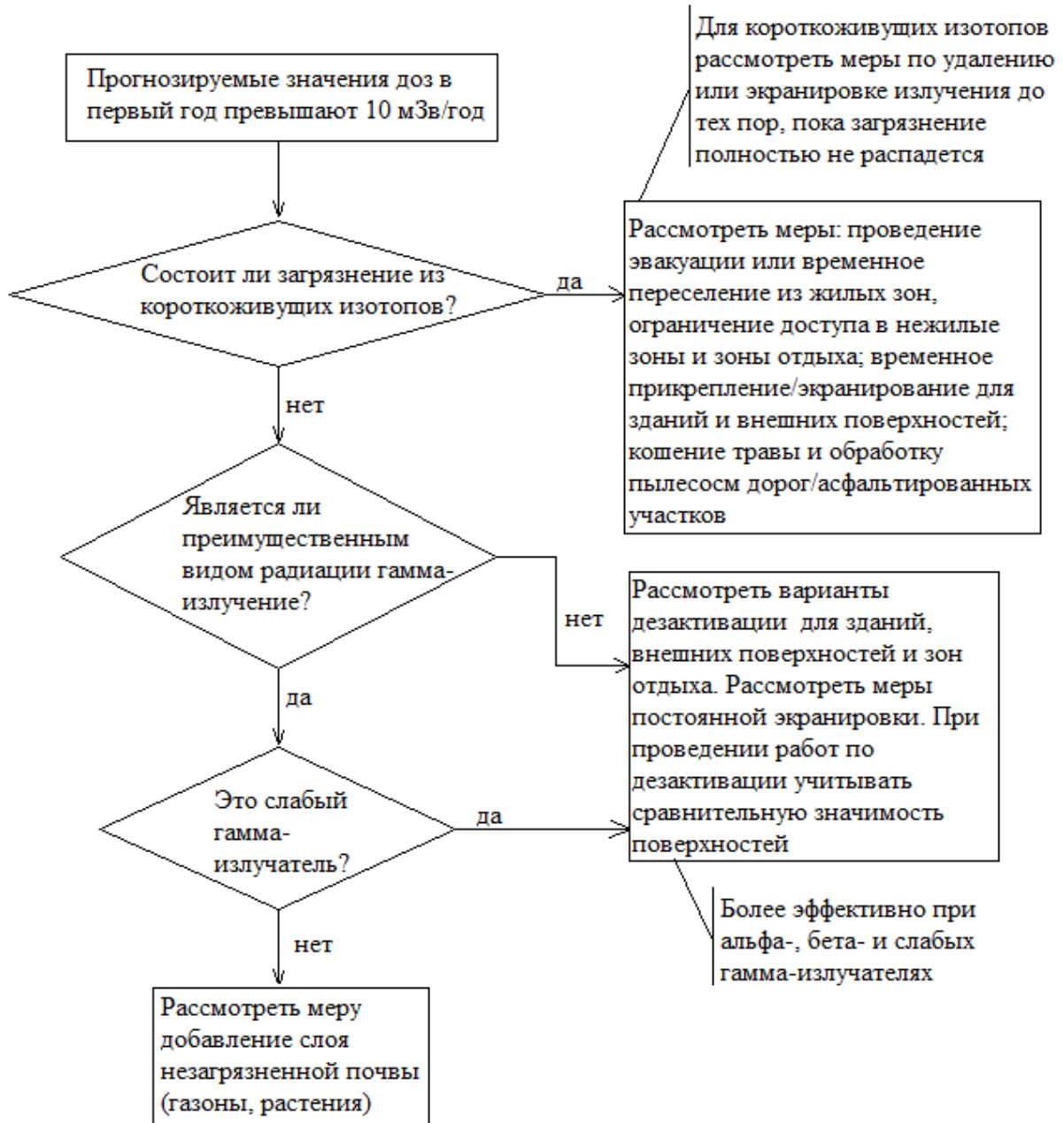


Рис.П.3.4 Дерево решений для разработки стратегий реабилитации при прогнозируемых уровнях доз более 10 мЗв/год в первый год после инцидента

Полный перечень мер вмешательств при устранении инцидентов, связанных с выбросом радиации

№	Описание контрмер
<b>Контрмеры до выброса и аварийные контрмеры (на начальном этапе)</b>	
1	Укрытие населения (см. лист данных 5 для более подробной информации по эффективности контроля загрязнения воздуха внутри зданий)
2	Эвакуация населения
3	Йодная профилактика
4	Использование "лепестков" для защиты органов дыхания
5	Закрывание окон, дверей и воздуховодов, а также контроль воздухообмена (для снижения долговременных доз внутри зданий)
6	Использование пылесосов для очистки воздуха
7	Укрытие ценных/личных вещей
<b>Контрмеры на стадии реабилитации: Ограничение доступа</b>	
8	Временное переселение из жилых зон
9	Постоянное переселение из жилых зон
10	Запрет доступа населения в нежилые районы
11	Ограничение доступа рабочих (временных или персонала) в нежилые районы
<b>Контрмеры на стадии реабилитации: Здания (общественные, промышленные и коммерческие здания, а также жилые дома)</b>	
12	Снос зданий
13	Обработка из пожарных шлангов
14	Очистка крыш
15	Пескоструйная обработка (стены)
16	Обработка струей воды высокого давления (стены и крыши)
17	Очистка крыш горячей водой высокого давления
18	Замена крыш
19	Обработка стен нитратом аммония
20	Механическая шлифовка деревянных стен
21	Прикрепление (фиксация) загрязнения на поверхностях
<b>Внутренние поверхности (все здания)</b>	
22	Обработка пылесосом
23	Влажная уборка
24	Другие методы очистки (механическая, очистка шампунем, парообработка, итд)
25	Удаление поверхностей, например, краски, обоев, ковров, итд
26	Удаление мебели и других предметов
<b>Внутренние поверхности (дополнительные меры для крупных общественных зданий, таких как вокзалы)</b>	
27	Агрессивная чистка внутренних загрязненных поверхностей
<b>Ценные объекты и личные вещи</b>	
28	Хранение, экранировка/укрытие, мягкая очистка

<b>Контрмеры на стадии реабилитации: Дороги и асфальтированные участки (и другие твердые поверхности на улице)</b>	
29	Обработка из пожарных шлангов
30	Обработка пылесосом
31	Обработка струей воды высокого давления
32	Удаление и замена поверхности (планирование дорог)
33	Переворачивание плит покрытия
34	Прикрепление (фиксация загрязнения на поверхностях)
<b>Контрмеры на стадии реабилитации: Почва и газоны</b>	
35	Кошение травы
36	Удаление растений и кустарников
37	Сбор дерна (удаление дерна как мера по дезактивации)
38	Удаление верхнего слоя почвы и дерна (механическое)
39	Удаление верхнего слоя почвы и дерна (ручное)
40	Добавление незагрязненного слоя почвы
41	Прикрепление (фиксация загрязнения на поверхностях)
№	<b>Описание контрмер</b>
Дополнительные меры для садов/открытых площадок	
42	Ротация (механическая выемка грунта)
43	Ручная выемка грунта
44	Покрытие газонов и участков земли (например, асфальтирование)
45	Тройная выемка грунта
Дополнительные меры для обширных открытых пространств (парки, сельские районы)	
46	Обработка плугом
47	Глубокая обработка плугом
48	Обработка плугом со снятием и захоронением верхнего слоя
<b>Контрмеры на стадии реабилитации: Все районы вне зданий</b>	
49	Нанесение покрытий
50	Уборка снега
<b>Контрмеры на стадии реабилитации: Деревья и кустарники</b>	
51	Сбор листьев
52	Подрезка/удаление деревьев и кустарников
<b>Контрмеры на стадии реабилитации: Специальные поверхности (особенно металлы)</b>	
53	Ультразвуковая обработка с химической дезактивацией
54	Очистка загрязненных систем вентиляции
55	Замена фильтров
56	Химическая обработка металлических поверхностей
57	Химическая обработка пластиковых поверхностей и поверхностей с покрытием
58	Добавление удаляемой полимерной пасты на металлические поверхности
59	Электрохимическая обработка металлических поверхностей

### Мера вмешательства «самопомощь»

"Самопомощь" включают набор простых мер, которые могут быть выполнены пострадавшими самостоятельно и которые в общем случае не

требует наличия специального опыта. Преимущества и недостатки мер по реабилитации, реализуемых самостоятельно по сравнению с профессионалами, приведены в таблице П.3.3. После Чернобыльской аварии, методы самопомощи, введенные в сильно загрязненных районах бывшего Советского Союза, чрезвычайно положительно воспринимались пострадавшим населением (Beresford et al., 2001).

Таблица П.3.3

## Преимущества и недостатки меры «самопомощь»

<b>Преимущества</b>
Контрмеры "самопомощи" персонально вовлекают пострадавшее население в работы по улучшению ситуации в районах их проживания. Это может способствовать пониманию сравнительного значения различных видов облучения и лучшему пониманию того, как уменьшить облучение.
Пострадавшее население приобретает чувство контроля над ситуацией, а знания, приобретенные в ходе выполнения работ, могут уменьшить беспокойность.
Пострадавшее население точно знает, что было предпринято для улучшения ситуации и насколько хорошо это было сделано.
<b>Сравнительно эффективно с экономической точки зрения</b>
Имеет преимущество привлечения дополнительной рабочей силы в случае, если требуется обработать значительные площади за короткий промежуток времени (например, скашивание травы).
Соответствует важным этическим ценностям автономности, свободы и достоинства.
<b>Недостатки</b>
Люди, участвующие в подобных реабилитационных мероприятиях, будут связаны ограничениями на облучение для населения (см. Часть II: Раздел 1).
Люди, участвующие в реабилитационных мероприятиях должны быть защищены, как описано в Разделе 9.
Должны выполняться на добровольной основе.
Потребуется аккуратное и подробное информировании населения, что может занять значительное количество времени.
Мероприятия могут быть реализованы неэффективным образом.

Исходные данные для расчета затрат на осуществление мер вмешательства в крупном промышленном городе в России

Показатель	Обозначение	Размерность	Значение
Стоимостная оценка потерь здоровья населения России от радиационного воздействия (при хроническом облучении)	$VE$	тыс.долл. США/чел.-Зв.	5,2
Стоимостная оценка потерь здоровья населения России от радиационного воздействия (при остром облучении)	$VE$	тыс.долл.США /чел.-Зв.	10,4
Численность населения	$N$	тыс. чел.	196
Общая площадь, занимаемая зданиями (жилыми и нежилыми) в населенном пункте	$S_1$	кв. км.	0,93
Общая площадь фасадов зданий в населенном пункте	$S_2$	кв. км.	3,73
Площадь жилых помещений на 1 жителя	$S_{n3}$	кв. м./чел.	24
Площадь нежилых помещений на 1 жителя	$S_{n4}$	кв. м./чел.	19
Общая площадь дорог и тротуаров в населенном пункте	$S_5$	кв. км.	5,3
Общая площадь лесопарковых зон в населенном пункте	$S_6$	кв. км.	7,55
Общая площадь остальных поверхностей в населенном пункте	$S_7$	кв. км.	36
Стоимость дезактиваций 1 кв км. крыш зданий (чистка без замены поверхностей, $f=1.43$ )	$c_{11}$	млн. долл. США/кв. км.	29,5
Стоимость дезактивации 1 кв км. фасадов зданий (чистка без замены поверхностей $f=1.43$ )	$c_{12}$	млн. долл. США/кв. км.	12,8
Стоимость дезактивации 1 кв км. жилых помещений (чистка без замены поверхностей $f=1.43$ )	$c_{13}$	млн. долл. США/кв. км.	8,4
Стоимость дезактивации 1 кв км. нежилых помещений (чистка без замены поверхностей $f=1.43$ )	$c_{14}$	млн. долл. США/кв. км.	4,2
Стоимость дезактивации 1 кв км. асфальтированных дорог и тротуаров (чистка без замены поверхностей $f=1.43$ )	$c_{15}$	млн. долл. США/кв. км.	3,8
Стоимость дезактивации 1 кв км. лесопарковых зон (чистка без замены поверхностей $f=1.43$ )	$c_{16}$	млн. долл. США/кв. км.	0,5
Стоимость дезактивации 1 кв км. прочих поверхностей	$c_{17}$	млн. долл. США/кв. км.	0,2
Стоимость дезактиваций 1 кв км. крыш зданий (с заменой поверхностей $f=3.33$ )	$c_{11}$	млн. долл. США/кв. км.	98,6
Стоимость дезактивации 1 кв км. фасадов зданий (с заменой поверхностей $f=3.33$ )	$c_{12}$	млн. долл. США/кв. км.	12,8

Таблица П.3.4 (продолжение)

Стоимость дезактивации 1 кв км. жилых помещений (с заменой поверхностей $f=3.33$ )	$c_{13}$	млн. долл. США/кв. км.	8,4
Стоимость дезактивации 1 кв км. нежилых помещений (с заменой поверхностей $f=3.33$ )	$c_{14}$	млн. долл. США/кв. км.	4,2
Стоимость дезактивации 1 кв км. асфальтированных дорог и тротуаров (с заменой поверхностей $f=3.33$ )	$c_{15}$	млн. долл. США/кв. км.	3,8
Стоимость дезактивации 1 кв км. лесопарковых зон (с заменой поверхностей $f=3.33$ )	$c_{16}$	млн. долл. США/кв. км.	0,5
затраты на сбор, транспортировку и размещение 1 кг твердого, «безопасного» мусора на свалке	$c_{21}$	долл. США /кг.	15
затраты на сбор, транспортировку, обработку и хранение твердого, «опасного» мусора	$c_{22}$	долл. США /кг.	50
затраты на сбор, транспортировку и фильтрацию 1 м <sup>3</sup> жидких отходов	$c_{23}$	долл. США /куб. м.	20
затраты на разовую санобработку 1 машины	$c_{31}$	долл. США /машину	10
затраты на разовую санобработку 1 жителя	$c_{32}$	долл. США /чел.	0,3
количество автомобилей, приходящихся на 1 жителя	$\chi$	машин/чел.	0,29
затраты на эвакуацию 1 жителя в безопасную зону	$c_{41}$	долл. США /чел.	3
затраты на размещение (предоставление жилого помещения) и содержание (питание, оказание медицинских услуг и т.д.) в единицу времени 1 эвакуированного жителя	$c_{51}$	долл. США /чел.	300
средний годовой валовый внутренний (региональный) продукт на душу населения	$ВРП_{\partial}$	тыс. долл. США /чел.	13
затраты на предоставление постоянного жилья на 1 эвакуированного человека	$c_{61}$	тыс. долл. США /чел.	14
средняя стоимость утерянного личного имущества на 1 эвакуированного жителя	$c_{71}$	тыс. долл. США /чел.	4
стоимость основных фондов на душу населения в загрязненной зоне	$ОФ_{\partial}$	тыс. долл. США /чел.	10
стоимость 1 кв. км. земель предназначенных для проживания [17]	$g_{прож}$	млн. долл. США /кв.км.	20,5
стоимость 1 квадратного километра земли промышленного назначения [17]	$g_{пром}$	млн. долл. США /кв.км.	7,8
стоимость 1 квадратного километра сельскохозяйственной земли [17]	$g_{сх}$	млн. долл. США /кв.км.	7,8
Общая площадь жилых земель [17]	$S_{прож}$	кв.км.	2,5
Общая площадь промышленных зон [17]	$S_{пром}$	кв.км.	15
Общая площадь земель сельскохозяйственного назначения [17]	$S_{сх}$	кв.км.	37,5



Таблица П.3.4 (продолжение)

Период полураспада Цезия-137	$T_{cs137}$	лет	30
Период полураспада Йода-131	$T_{I131}$	дни	8
Снижение концентрации изотопов на равнинной местности, обусловленное вертикальной и горизонтальной миграцией радионуклидов	$\mu$	год <sup>-1</sup> .	0,025
Ожидаемая продолжительность жизни среднего по возрасту индивида	$t_a$	лет.	36

Таблица П.3.5

Перечень работ, количество отходов и затраты рабочей силы при проведении дезактивации с полной заменой поверхностей [102]

Поверхности	Процедуры очистки	Отходы		Интенсивность работ (чел. час-м <sup>2</sup> )
		Твердые (кг/м <sup>2</sup> )	Жидкие (л/м <sup>2</sup> )	
Крыши зданий	Чистка крыш горячей водой высокого давления, замена поверхности крыши	4,1	30	1,92
Фасад зданий	Обработка струей высокого давления, пескоструйная обработка стен, обработка стен нитратом аммония, механическая шлифовка, лакировка, покраска	4,7	76	1,19
Жилие помещений	Обработка пылесосом, влажная уборка, механическая очистка чистящими средствами, парообработка, очистка вентиляции, удаление поверхностей, удаление мебели	4,4	1,0	0,28
Нежилые помещения	Обработка пылесосом, влажная уборка, очистка вентиляции, химическая обработка поверхностей, ультразвуковая обработка с химической дезактивацией	3,4	1,0	0,07
Дороги и тротуары	Обработка из пожарных шлангов, пылесосом, струей воды высокого давления, удаления и замена поверхностей (до 15 см. - асфальт, грунт, плитку).	30,5	50	0,72

Таблица П.3.5 (продолжение)

Лесопарковая зона	Кошение травы, подрезка кустарников и деревьев, удаление растений, кустарников, верхнего слоя почвы и дерна, добавление незагрязненного слоя почвы, ротовация и ручная выемка грунта, покрытие газонов,	21,9		5,59
Остальные поверхности	Уборка улиц	0,5		0,003

Таблица П.3.6

Перечень работ, количество отходов и затраты рабочей силы при проведении дезактивации без замены поверхностей [102]

Поверхности	Процедуры очистки	Отходы		Интенсивность работ (чел. час-м <sup>2</sup> )
		Твердые (кг/м <sup>2</sup> )	Жидкие (л/м <sup>2</sup> )	
Крыши зданий	Чистка крыш горячей водой высокого давления	0,6	30,0	0,92
Фасад зданий	Обработка струей воды высокого давления, пескоструйная обработка стен, обработка стен нитратом аммония	3,3	76,0	0,44
Жилые помещения	Обработка пылесосом, влажная уборка, очистка вентиляции, механическая обработка чистящими средствами, парообработка	0,0	1,0	0,12
Нежилые помещения	Обработка пылесосом, влажная уборка, очистка вентиляции, химическая обработка поверхностей, ультразвуковая обработка с химической дезактивацией	3,4	1,0	0,03
Дороги и тротуары	Обработка из пожарных шлангов, обработка пылесосом, обработка струей воды высокого давления	0,5	50,0	0,12
Лесопарковая зона	Кошение травы, подрезка кустарников и деревьев, обработка плугом, сбор листьев	1,6		0,05
Остальные поверхности	Уборка улиц	0,5		0,003