

**В.К. Иванов, А.М. Корело,
А.П. Панфилов, С.В. Райков**

**АРМИР:
система оптимизации
радиологической защиты
персонала**

Издательство «Перо»
Москва 2014

УДК 621.039-78
ББК 31.4
А 83

Авторы: В.К. Иванов, А.М. Корело, А.П. Панфилов, С.В. Райков, С.Ю. Чекин, В.В. Кашеев, А.М. Агапов, А.А. Мурашко, М.Ю. Калинина, М.А. Максютов, К.А. Туманов, А.Н. Меняйло.

А 83 АРМИР: система оптимизации радиологической защиты персонала. – М. Издательство Перо, 2014. – 302 с.

ISBN 978-5-00086-108-0

Монография посвящена оптимизации радиологической защиты персонала, состоящего на индивидуальном дозиметрическом контроле, с учетом индивидуальных доз облучения и оценок радиационных рисков.

Приводится анализ базовых математических моделей по оценке радиационных рисков, предложенных Научным комитетом ООН по действию атомной радиации, Международной комиссией по радиологической защите и МАГАТЭ. Особое внимание при этом уделяется проблеме оценки факторов неопределённости и возможных погрешностей в численном определении величины радиационно обусловленных рисков онкологических заболеваний.

Разработана система АРМИР, реализующая современную компьютерную технологию оценки индивидуальных радиационных рисков в ситуациях существующего, планируемого и аварийного облучения. Показаны возможности системы АРМИР для решения комплексных проблем оптимизации радиационной защиты персонала в более 50 ядерно и радиационно опасных предприятий Госкорпорации «Росатом». Индивидуальный риск определён для 61304 человек, что составляет 90,8 % от численности персонала группы А в отрасли. Повышенный риск (более 10^{-3} год⁻¹) выявлен только у 769 человек, что составляет 1,25 % персонала, состоящего на индивидуальном дозиметрическом контроле.

Приводится сравнительный анализ текущих радиационных рисков профессионального и медицинского облучения.

Для научных работников – экологов, радиационных эпидемиологов, радиологов, гигиенистов, а также специалистов в области нормирования и радиационной защиты.

ARMIR: THE SYSTEM FOR OPTIMIZATION OF RADIOLOGICAL PROTECTION OF THE STAFF

The monograph is devoted to optimization of radiological protection of the personnel monitored for radiation exposure with account of individual radiation doses and radiation risks estimates.

Existing models for estimating radiation risk proposed by the UN Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), International Commission on Radiological Protection (ICRP), World Health Organization (WHO) and International Atomic Energy Agency (IAEA) are analyzed. Special attention is paid to evaluation of impact of uncertainty factor on radiation risk estimate.

The ARMIR system based on state-of-the-art methods for estimating individual radiation risk from existing, planned and emergency exposures was developed. Capabilities of the system to solve complex tasks of optimization of radiation protection of the personnel were demonstrated in more than 50 dangerous nuclear plants of the State Corporation Rosatom. Individual risk is estimated for 61304 workers, it covers about 90.8 % of the group A staff. Among all workers monitored for radiation exposure only 769 workers, 1.25 %, have increased radiation risk (above 10^{-3} year⁻¹).

Comparative analysis of current radiation risks from occupational and medical radiation is performed.

For research workers, ecologists, radiation epidemiologists, hygienists as well as for reregulation and radiological protection experts.

ББК 31.4

ISBN 978-5-00086-108-0

© Коллектив авторов, 2014

Все права авторов защищены. Ни одна часть этого издания не может быть занесена в память компьютера либо воспроизведена любым способом без предварительного письменного разрешения издателя.

Оглавление

Предисловие.....	7
Глава 1. Базовые математические модели в оценке радиационных рисков персонала.....	14
1.1. Оценка индивидуального радиационного риска при профессиональном хроническом облучении ..	14
1.2. Оценка индивидуальных радиационных рисков при различных сценариях профессионального хронического облучения	29
1.3. Сравнительный анализ современных моделей оценки радиационных рисков МКРЗ и НКДАР ООН.....	54
1.4. Формирование групп потенциального онкологического риска при профессиональном облучении на основе технологий молекулярной и радиационной эпидемиологии	80
1.5. Исследование влияния неопределённости фоновых показателей заболеваемости на прогноз радиационных рисков по моделям МКРЗ для российских популяций при однократном облучении ...	97
1.6. Количественная оценка вероятности возникновения радиационно-индуцированных заболеваний вследствие внутреннего облучения	120
Глава 2. АРМИР: система оценки индивидуальных радиационных рисков профессионального облучения	131
2.1. Программно-информационное обеспечение системы АРМИР	131
2.2. Профессиональное облучение и радиационные риски персонала, состоящего на ИДК.....	141
2.3. Оценка радиационных рисков при планируемом повышенном облучении	149
2.4. Планирование профессионального облучения с учетом ограничения на величину индивидуального радиационного риска	158
2.5. Радиационная обусловленность возможных онкологических заболеваний работников атомной отрасли	160

Глава 3. Методические основы оптимизации радиологической защиты персонала с учётом обобщённого риска потенциального облучения	164
3.1. Оценка потенциального облучения в системе радиационной защиты Рекомендаций МКРЗ 2007 года и НРБ-99/2009	164
3.2. Оценка обобщённого риска потенциального облучения.....	167
3.3. Методика приближённого расчёта обобщённого риска потенциального облучения	182
3.4. Индекс безопасности потенциального облучения.....	184
3.5. Оптимизации радиологической защиты персонала на основе ИБПО	195
Глава 4. Радиационный риск медицинского и профессионального облучения	201
4.1. Оценка радиационного риска при однократном медицинском облучении	201
4.2. Оценка радиационного риска медицинского облучения в терминах эффективной и органнх доз.....	225
4.3. Расчёт эквивалентных доз в отдельных органах и тканях при проведении типовых обследований с использованием компьютерной томографии	243
4.4. Сравнение радиационных рисков профессионального и многократного медицинского облучений.....	252
Заключение	263
Литература	267
Приложение. Сводные данные по персоналу Госкорпорации «Росатом», включенному в систему АРМИР	276

Contents

Foreword	7
Chapter 1. Basic mathematical models for assessment of radiation risks for the staff	14
1.1. Estimating individual radiation risks from chronic exposure to radiation	14
1.2. Estimating radiation risks for different scenarios of occupational chronic radiation exposures.	29
1.3. Comparative analysis of modern ICRP and UNSCEAR risk models	54
1.4. Formation of group at potential risk for cancers from occupational radiation exposure using molecular biological methods in radiation epidemiology	80
1.5. Impact of uncertainties in baseline incidence rates on estimates of radiation risks from single radiation exposure of the Russian population made with ICRP models	97
1.6. Quantitative estimating probability of radiation-associated diseases from internal radiation	120
Chapter 2. ARMIR: the system for estimating individual risks from occupational radiation exposure	131
2.1. Software for the ARMIR system	131
2.2. Occupational radiation exposure and radiation risks for monitored staff	141
2.3. Estimating radiation risks from planned occupational exposure to excessive radiation	149
2.4. Planning occupational exposure with account of limits of individual radiation risk	158
2.5. Radiation causation of possible cancer in workers of the nuclear industry	160
Chapter 3. Methodological basics of optimization of radiological protection of the personnel with account of generic risk from potential radiation exposure	164
3.1. Assessment of potential exposures in the ICRP System of Radiological Protection and Russian National Safety Standards 99/2009	164

3.2. Estimating generic risk from potential exposure....	167
3.3. Method for approximate calculation of generic risk from potential exposure.....	182
3.4. Index of safety of potential exposure.....	184
3.5. Optimization of radiological protection of the staff based on the safety index of potential exposure.....	195
Chapter 4. Radiation risk from medical and occupational exposure.....	201
4.1. Estimation of radiation risk from single exposure for medical purposes	201
4.2. Estimation of risk from medical radiation exposure based on effective and organ dose	225
4.3. Calculation of organ and tissue-specific equivalent doses used in typical CT-procedures	243
4.4. Comparison of radiation risks from occupational and multiple medical exposures.....	252
Conclusion.....	263
References	267
Annex 1. Summary information on radiation doses and radiation risks for the staff of the State Corporation Rosatom plants monitored for radiation exposure.....	276

ПРЕДИСЛОВИЕ

В Основах государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности в Российской Федерации на период до 2025 года, утвержденных Президентом Российской Федерации, подчеркивается необходимость практической реализации «концепции социально приемлемого риска». В опубликованных недавно МАГАТЭ Международных основных нормах безопасности указывается (п. 3.110), что именно работодатель несет ответственность за объективность оценки радиационного риска работника за весь период его профессиональной деятельности.

В результате проведения многолетних крупномасштабных радиационно-эпидемиологических исследований в Хиросиме и Нагасаки после атомной бомбардировки в 1945 г. этих японских городов было, в частности, установлено, что смертность облученного в дозе 1 Зв населения от радиационно-обусловленных дополнительных онкологических заболеваний возросла на 4–7 %. Эта базовая оценка радиационного риска в настоящее время уже вошла во все действующие международные и национальные стандарты и нормы радиационной безопасности. Важно отметить, что в действующие в России Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) включены рискованные ограничения для персонала в условиях нормальной эксплуатации источников ионизирующего излучения (10^{-3} год $^{-1}$) и потенциального облучения ($2 \cdot 10^{-4}$ год $^{-1}$).

По данным Международной организации труда и Всемирной организации здравоохранения в настоящее время ежегодно примерно 200 несчастных случаев на производстве среди 1 млн. работников приводит к летальному исходу. Это означает, что вероятность такого события для работника составляет примерно $2 \cdot 10^{-4}$ год $^{-1}$, что соответствует введенному Международной комиссией по радиологической защите указанному выше предельному значению обобщенного рис-

ка потенциального облучения. Этим подтверждается, что принятые ограничения радиационного риска, по мнению авторитетных международных организаций, действительно находятся в зоне социальной приемлемости.

В Публичном отчете Госкорпорации «Росатом» за 2012 г. в перечне ключевых результатов отмечено достижение оценки индивидуальных радиационных рисков более чем у 90 % персонала, состоящего в настоящее время на индивидуальном дозиметрическом контроле. По данному интегральному показателю Госкорпорация «Росатом» безусловно занимает лидирующее положение в мире. Подчеркивается также, что повышенная величина радиационного риска выявлена только у 1,3 % персонала, и эта группа в основном состоит из ветеранов атомной отрасли.

Указанный в Публичном отчете важный результат по оценке радиационных рисков персонала был достигнут в течение последних 7-8 лет интенсивной совместной работы Департамента ядерной и радиационной безопасности Госкорпорации «Росатом», Российской научной комиссии по радиологической защите и Научно-производственной компании «Мединфо». Эта работа завершилась внедрением системы АРМИР на 52-х ядерно- и радиационно опасных предприятиях отрасли, обеспечившей ежегодный мониторинг уровня радиационной безопасности на основе современных международных и национальных стандартов по оценке радиационного риска.

В настоящей монографии последовательно показаны основные этапы и результаты выполненной научно-практической работы по созданию и внедрению системы АРМИР.

Первая глава посвящена описанию и исследованию базовых математических моделей по оценке радиационного риска при профессиональном облучении. Показана роль основных дозиметрических, демографических и медико-статистических характеристик, определяющих численные значения величины радиационного риска на индивидуаль-

ном уровне. Проводится сравнительный анализ действующих моделей оценки радиационного риска, предложенных Научным комитетом ООН по действию атомной радиации, Международной комиссией по радиологической защите, Всемирной организацией здравоохранения и МАГАТЭ. Особое внимание обращается на оценку фактора неопределенности и возможных погрешностей в численном определении величины радиационного риска.

Система АРМИР, реализующая современную технологию оценки индивидуальных радиационных рисков в ситуациях существующего, планируемого и аварийного облучения, описана во второй главе монографии. Показаны возможности системы АРМИР для решения комплексных проблем оптимизации радиационной защиты персонала при условии выполнения рискованных ограничений в действующих в стране Нормах радиационной безопасности. В последние годы Международная организация труда широко использует понятие атрибутивности (т.е. степени обусловленности) в характеристике радиационного риска. В частности, делается допущение о том, что возможное онкозаболевание связано с профессиональной деятельностью, если степень его радиационной обусловленности достигает 10 %. В монографии разработана технология оценки степени радиационной обусловленности возможных онкозаболеваний персонала и показано внедрение этой технологии на предприятиях отрасли.

Третья глава монографии посвящена разработке и внедрению технологии оценки обобщенного риска потенциального облучения. Критерий обобщенного риска потенциального облучения был введен недавно в Публикации 103 Международной комиссии по радиологической защите. Поскольку в данном случае рассматриваются потенциальные лучевые нагрузки среди персонала, вводится индекс безопасности потенциального облучения (ИБПО), определяемый обобщенными (усредненными) показателями достигнутой степени радиационной безопасности каждого предприятия Госкорпорации «Росатом».

В последние годы в научной и международной литературе были опубликованы данные о том, что в некоторых развитых в области атомной энергетики и промышленности странах лучевая нагрузка медицинского облучения уже превысила уровень профессионального облучения. Проблема оптимизации радиационной защиты персонала в терминах оценки риска одновременно профессионального и медицинского облучения детально рассмотрена в заключительной главе монографии.

Конкретные численные результаты функционирования системы АРМИР по оценке радиационных рисков на объектовом и отраслевом уровнях приведены в приложении.

Не вызывает сомнения, что широкомасштабное внедрение системы АРМИР на отраслевом и объектовом уровнях было бы невозможно без активной практической помощи ведущих специалистов в области ядерной и радиационной безопасности отдельных предприятий отрасли. Авторы монографии выражают им особую признательность.

FOREWORD

“Fundamentals of the National Policy in the Field of Nuclear and Radiation Security of the Russian Federation for the Period to 2025” adopted by the President of the Russian Federation point up the necessity for practical application of the concept of socially acceptable risk. Recently published International Basic Safety Standards make an employer responsible for adequate assessment of radiation risk for an employee for the whole period of his/her professional activities (para. 3.110).

Results of long-term large-scale radiation epidemiological studies of health status of A-bomb survivors in Hiroshima and Nagasaki demonstrated 4-7 % increase in the mortality from radiation-induced cancer among the survivors received dose of 1 Sv. In international and national standards for radiological protection an overall fatal cancer risk from ionizing radiation of about 5 % per Sv is used for all populations and ages. The point to be emphasized is that in current Russian radiation safety standards there are risk limits for the personnel dealing with sources of ionizing radiation under standard operational conditions ($10^{-3} \text{ year}^{-1}$), and in case of potential exposure to radiation ($2 \cdot 10^{-4} \text{ year}^{-1}$).

According to information of the International Labor Organization (ILO) and the World Health Organization (WHO) about 200 work-related fatalities per 106 people are annually registered. It means that the probability of the fatal case is about $2 \cdot 10^{-4} \text{ year}^{-1}$, this value corresponds to the limit level of generic risk from potential exposure to radiation recommended by ICRP. In the opinion of the recognized international organizations the adopted limits for radiation risk are within frames of social acceptability.

In their Public report for 2012 the State Corporation Rosatom recognized the result of work on assessment of individual radiation risks in about 90 % of nuclear workers of the industry monitored for radiation exposure, as the important achievement.

By this integral indicator the State Corporation Rosatom has leading positions in the world. Also, an increased radiation risk value in 1.3 % of the personnel was reported, the most part of them were old stagers.

The considered achievement is a result of 7-year intense team-work of the Department of Nuclear and Radiation Safety of the State Corporation Rosatom, Russian Scientific Commission on Radiological Protection and the Research and Production Company “Medinfo”. The work was completed with adaptation of the ARMIR system in 52 dangerous radiation and nuclear plants to carry out annual monitoring for radiation safety based on present-day international and national standards.

The basic steps and results of implemented research and practical application of the ARMIR system are described in the book.

Description and research into basic mathematical models for estimating radiation risk from occupational exposure are given in the Chapter 1. The role of main characteristics, such as dose, demographic, medical and statistical, which determine a value of individual radiation risk is specified. Comparative analysis of existing models for estimating radiation risk proposed by the UN Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), International Commission on Radiological Protection (ICRP), World Health Organization (WHO) and International Atomic Energy Agency (IAEA) is performed. Special attention is paid to estimating impact of uncertainty factor on radiation risk value.

The ARMIR system based on state-of-the-art methods for estimating individual radiation risk in existing, planned and emergency exposure situations is described in the Chapter 2. Capabilities of the system to solve complex tasks of optimization of radiation protection of the personnel within risk limits specified in the National Radiation Safety Standards are described in the chapter. In recent years the ILO often uses the term “attributability” (the degree of causation) for characterization of radiation risks . It is assumed that possible cancer is attributed to occupa-

tional exposure to radiation if the degree of causation is 10 percent. Developed method for assessment of attributability of cancer in the personnel of nuclear industry to ionizing radiation and its application in nuclear plants are discussed in the book.

In the Chapter 3 development and application of the method for assessment of generic risk of potential exposure to ionizing radiation are presented. The criterion of generic risk of potential exposure was put into use in the ICRP publication 103. As far as potential radiation exposure of a personnel to radiation is concerned, index of safety of potential radiation exposure is put into use. It is defined as generic, averaged, indicator of radiation safety achieved in a nuclear facilities of the State Corporation Rosatom.

As recently reported in scientific and international literature, in some developed countries radiation dose from medical exposure exceeds radiation dose from occupational exposure. Problem of optimization of radiation protection of the personnel in terms of estimation of radiation risks from occupational and medical exposure is considered in detail in the last chapter.

Specific numerical results of application of the ARMIR system to estimating radiation risks at the level of a plant and in the industry taken as whole are given in the annex.

Undoubtedly, large-scale introduction of the ARMIR system in plants and in industry as a whole was possible due to practical assistance of leading professionals in the field of nuclear and radiation safety. The authors of the book extend their deepest gratitude to them.

ГЛАВА 1

БАЗОВЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В ОЦЕНКЕ РАДИАЦИОННЫХ РИСКОВ ПЕРСОНАЛА

1.1. Оценка индивидуального радиационного риска при профессиональном хроническом облучении

В Основах государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года, утвержденных Президентом Российской Федерации, подчеркивается, что к основным принципам этой политики должна быть отнесена «реализация концепции социально приемлемого риска». Рассмотрим эту проблему более детально для персонала, подвергающегося хроническому профессиональному облучению в условиях нормальной эксплуатации. В соответствии с международной практикой верхний уровень приемлемого индивидуального риска при техногенном облучении персонала определяется вероятностью смерти 10^{-3} год⁻¹. Следует отметить, что эта величина риска (10^{-3} год⁻¹) приводится также (п. 2.3) в действующих в России Нормах радиационной безопасности (НРБ-99/2009) [НРБ-99/2009, 2009]. Каким образом обосновывается это значение риска? Хорошо известно, что для человека, получившего дозу облучения в 1 Зв, риск реализации избыточного (над спонтанным уровнем) радиационно-обусловленного рака за жизнь составляет примерно $5 \cdot 10^{-2}$. Учитывая эту оценку, аналогичный риск при дозе 0,02 Зв/год (НРБ-99/2009) составит, естественно, 10^{-3} год⁻¹. Понятно, что такой упрощенный подход не учитывает ряд важных индивидуальных характеристик при хроническом профессиональном облучении, а именно: возраст на начало облучения, достигну-

тый возраст, пол, распределение уровня облучаемости во времени профессиональной деятельности и др. Рассмотрим простой пример [Preston et al., 1994]. Так, в частности, риск индукции радиационно-обусловленных лейкозов при возрасте облучения в 50 лет в 2,5 раза ниже, чем при возрасте облучения в 30 лет при одинаковых дозах в обоих случаях.

Таким образом, оценка уровня индивидуального риска и «реализация концепции социально приемлемого риска» требует изменения существующей технологической платформы обеспечения радиационной безопасности на основе использования введенного на международном уровне понятия «дозовой матрицы».

Международные стандарты радиационной безопасности в терминах «дозовой матрицы»

Уход в международных стандартах от использования величины коллективной дозы был четко обозначен в 2006 г. в Публикации 101 МКРЗ [ICRP Publication 101, 2006]. В этой публикации рекомендуется прогнозировать отдаленные эффекты радиационного воздействия с учетом целого ряда дополнительных (недозовых) характеристик демографического, экономического и социального характера (рис. 1.1.1). По сути дела, в документе дается структура необходимой для целей прогноза «дозовой матрицы». Нельзя также не согласиться с одним из основных выводов Публикации 101 МКРЗ по ограничению использования коллективной дозы (рис. 1.1.2). Этот вывод полностью подтверждается оценкой медицинских последствий Чернобыля. В частности, при коллективной дозе более 10 тыс. чел.-Зв для населения Брянской области (1,42 млн. чел.) до настоящего времени не выявлено увеличения частоты онкологических заболеваний (исключение – рак щитовидной железы у детей на момент 1986 г.) [Ivanov et al., 2004].

«Каждая группа из популяции, подвергшейся действию источника, может быть описана различными атрибутами, такими как возраст, пол и привычки, а так же различными параметрами облучения...

...полная коллективная доза не является полезным средством помощи принятия решения...

Результат может быть представлен многомерной матрицей коллективных доз»

Стр. 73, пар. (n), (p)

Стр. 74, пар. (q)

Рис. 1.1.1. Публикация 101 МКРЗ: Оптимизация радиологической защиты, («дозовая матрица»)

«Коллективная доза в 1 чел.-Зв, получающаяся из 10-ти индивидуальных доз по 100 мЗв, и такая же коллективная доза, получающаяся из 1000 доз по 1 мЗв, не будут оцениваться одинаково»

Стр. 97, пар. A11

$10 \times 100 \text{ мЗв} \neq 1000 \times 1 \text{ мЗв}$

Рис. 1.1.2. Публикация 101 МКРЗ: Оптимизация радиологической защиты, (коллективная доза)

Большое значение для обоснования возможности оценки радиационных рисков на индивидуальном (индивидуализированном) уровне имели отчеты в 1994 и 2000 гг. Научного комитета ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН) [UNSCEAR, 1994; UNSCEAR, 2000]. Именно базирываясь на предложенных НКДАР ООН моделях, МАГАТЭ в 1996 г. выпустило специальный технический документ по оценке индивидуальных радиационных рисков

в условиях хронического профессионального облучения [IAEA, 1996].

Важно также отметить, что в вышедших в 2007 г. новых Рекомендациях МКРЗ (п. В240) прямо указано, что для избежания ошибок применения коллективной дозы должны учитываться также: число облученных лиц; пол и возраст; диапазон индивидуальных доз, распределение полученных доз во времени, географические характеристики облученной популяции [ICRP Publication 103, 2007].

Следует четко понимать, что предложенные технологии оценки индивидуальных радиационных рисков ни в коей мере не выступают в качестве альтернативы основным нормируемым дозовым пределам. Вместе с тем, следует также четко понимать, что «реализация концепции социально приемлемого риска» требует применения указанных выше международных стандартов при создании новой технологической платформы обеспечения ядерной и радиационной безопасности.

Технология оценки индивидуальных радиационных рисков

Основным неблагоприятным фактором воздействия радиации на здоровье человека является, как известно, увеличение вероятности или риска возникновения онкологического заболевания. В зависимости от конкретной ситуации принято использовать ряд основных и дополнительных (характеризующих радиационное воздействие) показателей риска.

В отсутствие облучения основным показателем риска является показатель фоновой или спонтанной онкозаболеваемости λ_0 (число онкозаболеваний в год на 100 тыс. человек). Воздействие радиации приводит к увеличению риска λ_0 на дополнительную величину λ_R . Таким образом, полный риск заболе-

вания λ будет суммой фонового и радиационного риска:

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_R \quad (1.1.1).$$

Фоновые показатели заболеваемости зависят от возраста u и пола s : т.е. $\lambda_0(u, s)$, а радиационный риск в общем случае зависит от дозы облучения D , текущего возраста u , пола s и возраста на момент облучения g : $\lambda_R(u, s, D, g)$. Отсюда (1.1.1) примет вид:

$$\lambda(u, s, D, g) = \lambda_0(u, s) + \lambda_R(u, s, D, g) \quad (1.1.2).$$

Радиогенный риск λ_R в настоящее время представляется в двух моделях. В аддитивной модели полный риск есть:

$$\lambda = \lambda_0 + EAR \quad (1.1.3),$$

где EAR – избыточный абсолютный риск (Excess Absolute Risk), обусловленный только радиационным облучением.

В мультипликативной модели полный риск записывается в виде:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot (1 + ERR) \quad (1.1.4),$$

где безразмерная величина ERR есть избыточный относительный риск (Excess Relative Risk) или отношение избыточного абсолютного риска к фоновому риску:

$$ERR = \frac{EAR}{\lambda_0} \quad (1.1.5).$$

После облучения дополнительный радиационный риск – как EAR , так и ERR – может реализоваться только по прошествии определённого времени – латентного периода T_L .

В качестве производной от рисков важной характеристикой воздействия радиации на уровень онкозаболеваемости является величина атрибутивного риска AR :

$$AR = \frac{EAR}{\lambda_0 + EAR} \quad (1.1.6).$$

В целом для облученной популяции атрибутивный риск есть отношение числа радиационно-обусловленных он-

козаболеваний ко всему количеству онкозаболеваний. Эта величина также получила название этиологической доли [Гигиена труда, 2003]. Для конкретного облученного человека атрибутивный риск рассматривается в процентном выражении как вклад радиации в развитие онкологического заболевания.

Комитетом НКДАР ООН (1994 г., 2000 г.) предложены конкретные модели для определения величины *EAR* для лейкозов и солидных раков [UNSCEAR, 1994; UNSCEAR, 2000].

В заключение настоящего раздела следует отметить, что оценка годового риска смерти от индуцированного рака (рис. 1.1.3), предложенная НКДАР ООН и МАГАТЭ, хорошо согласуется с данными важной и более ранней работы Р. Кларка [Clarke, 1992]. Годовой риск избыточной онкосмертности достигает величины 10^{-3} при облучении дозой примерно 15 мЗв с 18 до 64 лет.

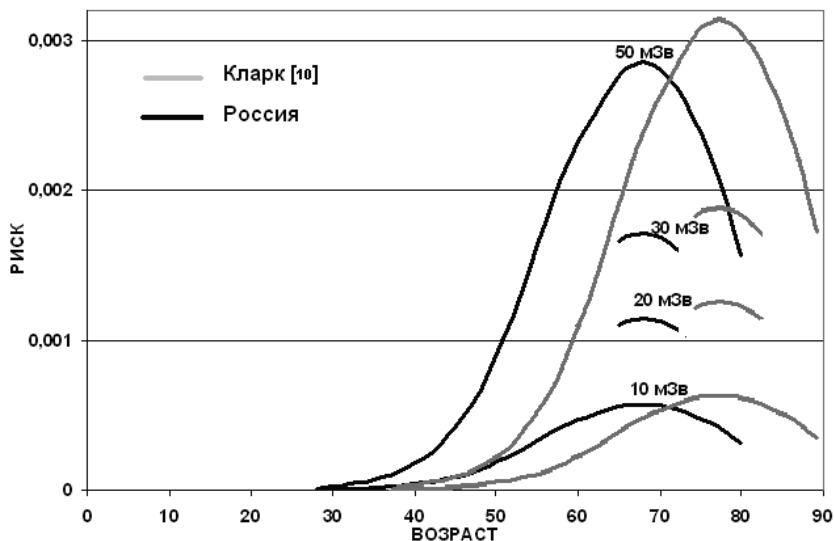
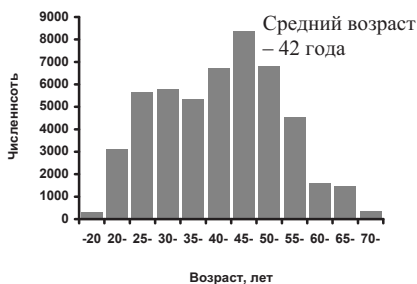


Рис. 1.1.3. Годовой риск смерти от индуцированного рака при облучении с 18 до 64 лет

Реализация технологии оценки индивидуальных радиационных рисков

Предложенная выше технология оценки индивидуальных радиационных рисков, базирующаяся на рекомендованных НКДАР ООН моделях [UNSCEAR, 1994; UNSCEAR, 2000], была реализована с использованием данных предприятий атомной отрасли о персонале (49900 человек), состоящем на индивидуальном дозиметрическом контроле (ИДК). Основная задача ставилась следующим образом: определить численность персонала, для которого величина годового радиационно-обусловленного риска превышает значение 10^{-3} , определённого действующими Нормами радиационной безопасности [НРБ-99/2009, 2009].

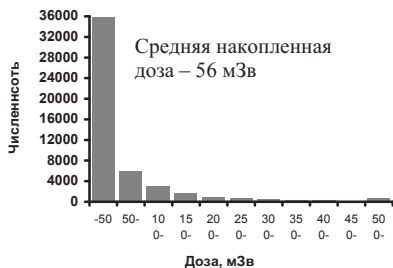
Возрастное распределение



Распределение по стажу



Распределение по накопленной дозе



Динамика средней годовой дозы



Рис. 1.1.4. Характеристики персонала предприятий атомной отрасли, состоящего на ИДК (49900 чел.)

На рис. 1.1.4 приведены основные характеристики персонала из указанной когорты.

На рис. 1.1.5 показана зависимость величины избыточного абсолютного риска (EAR) в 2006 г. для всех раков от стажа работы на ИДК. Величина EAR превышает значение 10^{-3} (п. 2.3 НРБ-99/2009) для 755 человек, что составляет 1,6 % от всего рассматриваемого персонала. Можно разбить весь персонал на 3 группы по данному фактору риска:

- риск тривиальный ($EAR < 10^{-4}$) – 41812 человек (83,8 % персонала);
- риск приемлемый ($10^{-4} \leq EAR \leq 10^{-3}$) – 7333 человека (14,6 % персонала);
- риск неприемлемый ($EAR > 10^{-3}$) – 755 человек (1,6 % персонала).

Следует отметить, что почти 84 % персонала относятся в настоящее время (2006 г.) к группе тривиального риска, т.е. вероятность реализации у них радиационно-обусловленных онкологических заболеваний пренебрежимо мала. 98,4 % персонала, состоящего на ИДК, имеют тривиальный и приемлемый риск ($\leq 10^{-3}$).

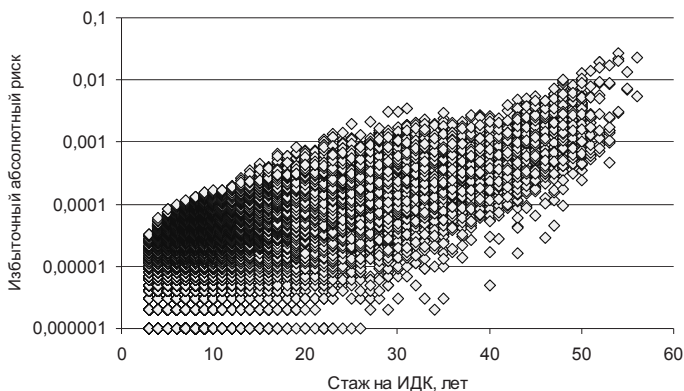


Рис. 1.1.5. Зависимость избыточного абсолютного риска (EAR) от стажа работы на ИДК (все раки)

Имеющаяся в наличии дозиметрическая информация позволяет дать оценку прогнозных индивидуальных рисков на 2008 г. (латентный период по лейкозам – 2 года). Как показывают расчеты, к 2008 г. распределение персонала по группам будет следующее:

- риск тривиальный – 40078 человек (80,3 % персонала);
- риск приемлемый – 8842 человека (17,7 % персонала);
- риск неприемлемый – 980 человек (2,0 % персонала).

Таким образом, к 2008 г. происходит некоторое сокращение численности группы тривиального риска (на 1734 человека) и увеличение численности групп приемлемого и не приемлемого риска. Следует отметить, что более отдаленный прогноз (3 и более года) требует привлечения данных об облучаемости в 2007 г. и позднее, которые могут на этом этапе (2006 г.) только планироваться.

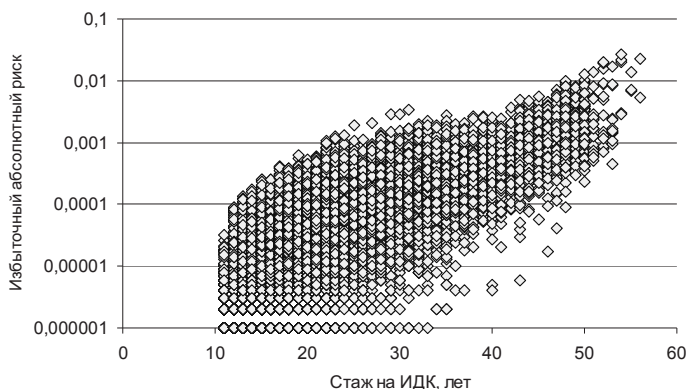


Рис. 1.1.6. Зависимость избыточного абсолютного риска (EAR_{SOL}) от стажа работы на ИДК (солидные раки)

На рис. 1.1.6 показана зависимость избыточного абсолютного риска (EAR_{SOL}) от стажа работы на ИДК только для солидных раков. Как видно из этого рисунка, неприемлемый риск (10^{-3}) реально достигается для персонала со стажем работы на ИДК, превышающим 20 лет (латентный период для

солидных раков составляет 10 лет). Важно также отметить, что небольшое число работников со стажем работы на ИДК более 45 лет имеют в настоящее время годовой риск индукции радиогенных солидных раков порядка 10^{-2} и даже несколько более.

На рис. 1.1.7 приведена зависимость избыточного абсолютного риска (EAR_{LKM}) от стажа работы на ИДК только для лейкозов (латентный период 2 года). Лейкозы – редкое заболевание (годовой спонтанный риск примерно 10^{-4}), поэтому, как и следовало ожидать, EAR_{LKM} не достигает предельного нормируемого значения 10^{-3} на всем временном интервале трудовой деятельности.

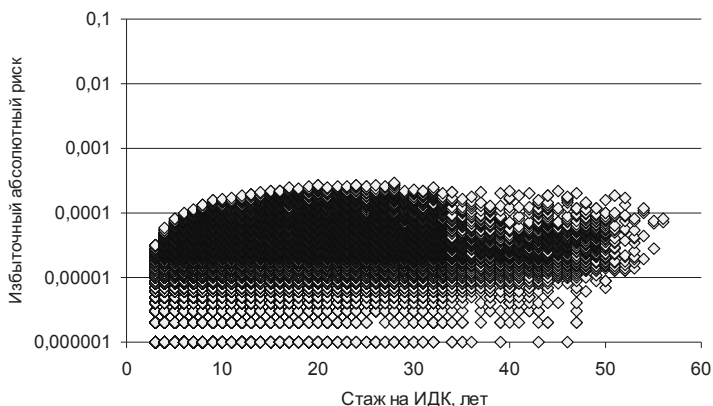


Рис. 1.1.7. Зависимость избыточного абсолютного риска (EAR_{LKM}) от стажа работы на ИДК (лейкозы)

На рис. 1.1.8–1.1.10 показаны зависимости атрибутивного риска, выраженного в процентах (AR – все раки, AR_{SOL} – солидные раки, AR_{LKM} – лейкозы), от стажа работы на ИДК. Наличие индивидуальной информации о величине атрибутивного риска (радиационно-обусловленной этиологической доли) существенно дополняет общую рисковую оценку, ранее приведенную в терминах избыточного абсолютного риска. Так, рассмотрим для примера более

подробно ситуацию с оценкой рисков радиационно-обусловленных лейкозов. Как видно из рис. 1.1.7, $EAR_{LKM} < 10^{-3}$ при любом стаже работы. Вместе с тем (рис. 1.1.10), AR_{LKM} по фактическим данным может превышать 70 % уровень. Это говорит о том, что вероятность заболеть лейкозом действительно крайне мала, но, если эта вероятность все-таки реализуется, то для некоторых работников радиационная обусловленность указанной патологии может значительно превышать 50 %. Поскольку на международном уровне введены пороги приемлемого атрибутивного риска [Wakeford, 1998], нам представляется обоснованным давать оценку индивидуально-го риска и говорить о его социальной приемлемости (персонал, население) с учетом индивидуальных показателей избыточного абсолютного риска (EAR , EAR_{SOL} , EAR_{LKM}) вместе с данными по атрибутивному риску (AR , AR_{SOL} , AR_{LKM}). Концепция атрибутивного риска была применена нами ранее при разработке системы АРМИР [Иванов В.К. и др., 2006а].

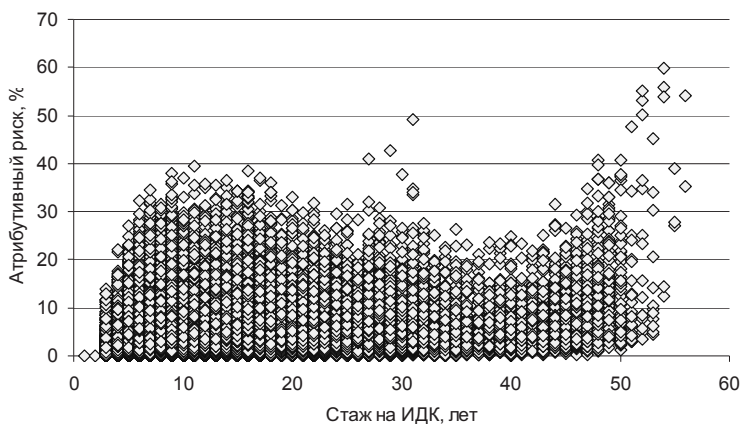


Рис. 1.1.8. Зависимость атрибутивного риска (AR) от стажа работы на ИДК (все раки)

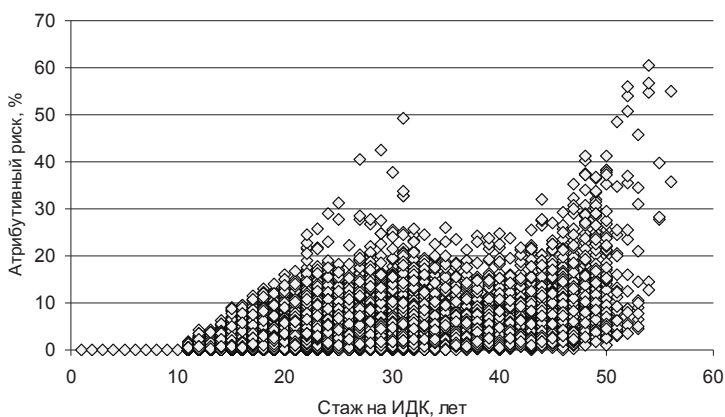


Рис. 1.1.9. Зависимость атрибутивного риска (AR_{SOL}) от стажа работы на ИДК (солидные раки)

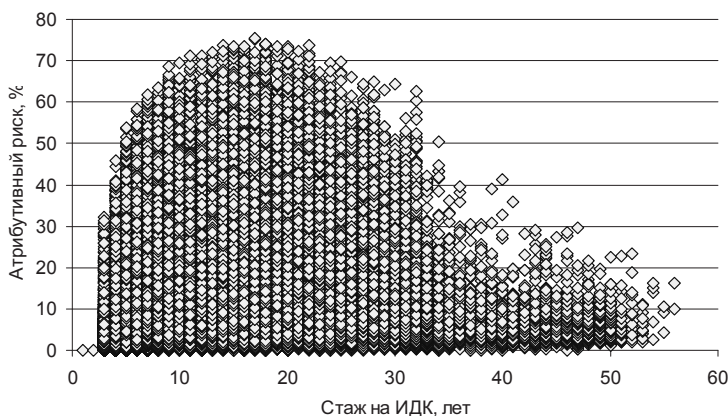


Рис. 1.1.10. Зависимость атрибутивного риска (AR_{LKM}) от стажа работы на ИДК (лейкозы)

Для оценки экономической и социальной эффективности практического внедрения новой технологической платформы оптимизации радиационной защиты персонала, ориентированной на управляемую индивидуальную облучаемость, важно дать конкретные численные значения ожидае-

мых (спонтанных) и радиационно-обусловленных онкозаболеваний. Так, для 49900 человек, состоящих на ИДК и включенных в анализ с использованием моделей НКДАР ООН, установлено, что в течение рассматриваемого года могут быть выявлены: 161 случай заболеваний солидными раками, из которых 5 могут быть радиогенными и 5 лейкозов (1 – радиационно-обусловленный). Легко подсчитать, что без внедрения описанной выше технологии оптимизации радиационной защиты в течение 30-40 лет ожидаемое число радиационно-обусловленных онкозаболеваний для этой когорты составит 220-240 случаев. Далее достаточно легко оценить прямые экономические потери.

В табл. 1.1.1–1.1.4 приведены в качестве примера риски в терминах EAR и AR (все раки, солидные, лейкозы) для разных возрастных групп при ежегодных дозах хронического облучения 5, 10, 15, 20 мЗв, начиная с возраста в 20 лет. Как видно из данных таблиц, максимальное значение EAR достигается в возрастной группе 60 лет (следовательно – при стаже на ИДК 40 лет). При дозе 5 мЗв в год величина EAR в 60 лет равна $2,7 \cdot 10^{-4}$ и не превосходит нормируемого значения 10^{-3} (п. 2.3 НРБ-99/2009). При ежегодном облучении дозой 15 мЗв (табл. 1.1.3) величина EAR для возраста 60 лет равна $8,2 \cdot 10^{-4}$, что также ниже значения 10^{-3} и хорошо согласуется с оценкой Р. Кларка [Clarke, 1992]. Однако при ежегодной дозе 20 мЗв (табл. 1.1.4) величина EAR в 60 лет равна $1,8 \cdot 10^{-3}$, что выше действующего норматива. При такой ежегодной дозе за весь период стажа на ИДК достигаются высокие значения атрибутивного риска: по солидным ракам атрибутивный риск возрастает с 1,1 % до 17,0 %; по лейкозам атрибутивный риск достигает максимального значения в 30 лет (т.е. через 10 лет после начала облучения) – 85,8 %, а затем (в отличие от AR_{SOL}) он уменьшается до 47,7 % (возраст 60 лет). Такая динамика EAR и AR действительно подтверждает необходимость давать рисковую характеристику на индивидуальном уровне в целом с учетом и абсолютного и атрибутивного рисков.

Таблица 1.1.1.

Оценка радиационных рисков в разных возрастных группах при облучении с 20 лет ежегодной дозой 5 мЗв

Возраст в 2006 г.	EAR _{SOL}	EAR _{LKM}	EAR	AR _{SOL}	AR _{LKM}	AR
30	$6,8 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	0,3	59,9	9,3
40	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$4,8 \cdot 10^{-5}$	2,5	53,8	6,6
50	$9,5 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	3,9	29,6	4,8
60	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$	4,9	18,4	5,2

Таблица 1.1.2.

Оценка радиационных рисков в разных возрастных группах при облучении с 20 лет ежегодной дозой 10 мЗв

Возраст в 2006 г.	EAR _{SOL}	EAR _{LKM}	EAR	AR _{SOL}	AR _{LKM}	AR
30	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$5,1 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-5}$	0,6	75,0	17,0
40	$3,4 \cdot 10^{-5}$	$6,2 \cdot 10^{-5}$	$9,6 \cdot 10^{-5}$	4,9	70,0	12,3
50	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	7,6	45,8	9,2
60	$5,1 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	9,3	31,1	9,9

Таблица 1.1.3.

Оценка радиационных рисков в разных возрастных группах при облучении с 20 лет ежегодной дозой 15 мЗв

Возраст в 2006 г.	EAR _{SOL}	EAR _{LKM}	EAR	AR _{SOL}	AR _{LKM}	AR
30	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$7,9 \cdot 10^{-5}$	$8,1 \cdot 10^{-5}$	0,8	81,8	23,6
40	$5,1 \cdot 10^{-5}$	$9,4 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	7,2	77,9	17,4
50	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-5}$	$3,7 \cdot 10^{-4}$	11,0	55,9	13,2
60	$7,6 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-5}$	$8,2 \cdot 10^{-4}$	13,4	40,5	14,1

Таблица 1.1.4.

Оценка радиационных рисков в разных возрастных группах при облучении с 20 лет ежегодной дозой 20 мЗв

Возраст в 2006 г.	EAR _{SOL}	EAR _{LKM}	EAR	AR _{SOL}	AR _{LKM}	AR
30	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	1,1	85,8	29,3
40	$6,7 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	9,3	82,5	22,0
50	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-4}$	14,1	63,0	16,8
60	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$8,5 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	17,0	47,7	17,9

Таблица 1.1.5.

Оценка радиационных рисков в разных возрастных группах при облучении с 20 лет ежегодной дозой 2,4 мЗв

Возраст в 2006 г.	EAR _{SOL}	EAR _{LKM}	EAR	AR _{SOL}	AR _{LKM}	AR
30	$3,3 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	0,14	41,7	4,7
40	$8,1 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	1,2	35,8	3,3
50	$4,6 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$5,8 \cdot 10^{-5}$	1,9	16,8	2,4
60	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	2,4	9,7	2,6

Как было отмечено выше, средняя доза персонала, состоящего на ИДК, в 2006 г. составила 2,4 мЗв (рис. 1.1.4). Какие можно ожидать радиологические последствия при таком режиме хронического облучения? Как видно из табл. 1.1.5, облучение дозой 2,4 мЗв с 20 до 50 лет дает тривиальный (пренебрежимый) радиационный риск ($EAR=5,8 \cdot 10^{-5}$), в возрасте 60 лет (40 лет стажа на ИДК) – риск приемлемый ($EAR=1,3 \cdot 10^{-4}$), и он существенно ниже порогового значения в 10^{-3} . За счет молодого возраста (30, 40 лет) атрибутивный риск (этиологическая доля радиационного фактора) лейкозов AR_{LKM} (табл. 1.1.5) достигает значения 41,7 % и 35,8 %. Аtribuтивный риск солидных раков AR_{SOL} во всех возрастах не превышает 2,4 %. Для решения задач долгосрочного прогноза при расчетах рисков (табл. 1.1.1–1.1.5) применя-

лась функция дожития на возрастном интервале от 20 до 60 лет [www.gks.ru].

Как было отмечено выше, в Основах госполитики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года ставится задача реализации концепции социально приемлемого риска. Таким образом, нам представляется, что индивидуальный радиационный риск на любом интервале производственной деятельности должен характеризоваться тремя основными параметрами (EAR , AR_{SOL} , AR_{LKM}), а его социальная приемлемость – конкретными значениями этих параметров [Иванов В.К. и др., 2006a; Ivanov et al., 2006; Wakeford et al., 1998].

После оценки величины индивидуального радиационного риска в терминах EAR , AR_{SOL} и AR_{LKM} могут решаться две основные задачи оптимизации радиационной защиты: управление облучаемостью на индивидуальном уровне; обеспечение ранней диагностики возможных радиационно-обусловленных заболеваний.

1.2. Оценка индивидуальных радиационных рисков при различных сценариях профессионального хронического облучения

В настоящее время Российская научная комиссия по радиологической защите (РНКРЗ) совместно с Госкорпорацией «Росатом» проводит работы в рамках пилотного проекта по внедрению в отрасли новой технологической платформы обеспечения радиационной безопасности персонала, состоящего на индивидуальном дозиметрическом контроле (ИДК) [Иванов В.К., 2005; Иванов В.К. и др., 2006a; Иванов В.К. и др., 2006б; Иванов В.К. и др., 2007]. Указанная технологическая платформа оперирует величинами индивидуального радиационно-обусловленного избыточного риска с целью оптимизации процессов радиационной защиты.

В представленной работе дается оценка величины ин-

дидивидуального радиационного риска персонала по технологии «дозовой матрицы» при различных сценариях, включая повышенное планируемое облучение.

От коллективной дозы к «дозовой матрице»

В качестве основного неблагоприятного эффекта радиационного воздействия в международных стандартах, прежде всего, рассматривается индукция возможных сопутствующих онкологических заболеваний.

В новых рекомендациях Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) действительно отмечаются серьезные ограничения по возможности использования величины коллективной дозы для оптимизации радиационной защиты [ICRP Publication 101, 2006]. Дело в том, что с точки зрения отдаленных радиологических последствий «большая доза на небольшое число людей не эквивалентна малой дозе на большое число людей, даже если оба эти случая численно соответствуют одинаковой коллективной дозе».

МАГАТЭ еще в 1996 г. на основе рекомендаций Научного комитета ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН) подготовило технический документ по оценке индивидуального канцерогенного риска среди работников атомной промышленности. Такие технологии оценки риска успешно действуют в ведущих ядерных странах, например, в США и Великобритании.

Рассмотрим простой пример, приведенный НКДАР ООН. Предположим, 100 млн. человек получили крайне низкую дозу облучения – по 1 мЗв. Таким образом, коллективная доза составит 100 тыс. чел.-Зв, и в рамках предыдущей модели МКРЗ ожидаемое число радиационно-обусловленных смертей от онкологических заболеваний должно составить около 5 тыс. человек. Подтверждается ли это практикой? Результаты крупномасштабных эпидемиологических исследований убедительно свидетельствуют: такое повышение он-

кологической заболеваемости при малых дозах облучения не доказано.

МКРЗ предлагает уход от коллективной дозы путем введения понятия «дозовой матрицы», обеспечивающей возможность оценки индивидуальных радиационных рисков. Поэтому при оптимизации радиационной защиты населения и персонала на основе международных стандартов основной проблемой в ближайшие годы будет оценка таких рисков.

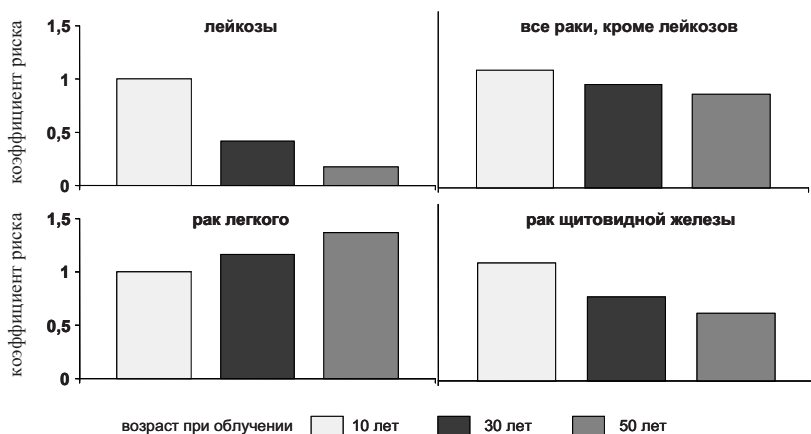


Рис. 1.2.1. Зависимость радиационного риска от возраста при облучении

За последние 20-30 лет были проведены крупномасштабные радиационно-эпидемиологические исследования по оценке зависимости «доза-эффект». Здесь, прежде всего, надо выделить данные по Хиросиме и Нагасаки. У жителей этих городов, подвергшихся атомной бомбардировке, число зафиксированных онкологических заболеваний примерно на 9 % превысило ожидаемый (спонтанный) уровень. Было также установлено, что наличие информации только о дозе облучения недостаточно для объективной оценки отдаленных медицинских последствий. Например, частота радиационно-обусловленных лейкозов многократно возрастает с уменьшением возраста человека во время облучения

(рис. 1.2.1) [Preston et al., 2007]. Все индивидуальные характеристики, дополнительно к дозе облучения, были заложены в модель оценки радиационного риска, которая получила согласование на международном уровне – в МАГАТЭ, МКРЗ, НКДАР ООН. Внедрение этой модели поможет в полной мере реализовать концепцию социально приемлемого риска при различных сценариях облучения.

Модель радиационных рисков UNSCEAR-94

Исследование японской когорты (LSS-когорты) позволило установить зависимость избыточного относительного риска (ERR) от дозы облучения, возраста при облучении и пола для онкологических заболеваний различной локализации. Эти данные в дальнейшем использовались при разработке моделей радиационных рисков онкологических заболеваний и, в частности, модели НКДАР ООН. НКДАР ООН разработана и предложена к использованию модель радиационных рисков онкологических заболеваний UNSCEAR-94 [UNSCEAR, 1994]. Согласно этой модели, радиационно-обусловленная заболеваемость солидными раками различной локализации при остром облучении представляется в виде избыточного относительного риска **ERR** и имеет вид:

$$ERR(D, g) = a \cdot D \cdot \exp(b \cdot (g - 25)) \quad (1.2.1),$$

где параметры риска a и b зависят от локализации заболевания; D – доза облучения в Зв; g – возраст на момент облучения. Латентный период для солидных раков принят равным 10 годам. Как видно из (1.2.1), на индивидуальном уровне риск ERR не зависит от уровня фоновой заболеваемости. Значения параметров a для солидных раков составляют 0,45 для мужчин и 0,77 для женщин. Для обоих полов $b = -0,026$.

На рис. 1.2.2 для солидных раков представлена зависимость **ERR** и **AR** ($AR = ERR / (1 + ERR)$ – атрибутивный риск) от возраста при однократном облучении мужчин в возрасте от 20 до 50 лет дозой 0,1 и 1,0 Зв. При расчете рисков учтен 10-летний латентный период. Так, при облучении

в 20 лет, радиационный риск начинает сказываться только с 30 лет. Риск в 60 лет определяется дозой, полученной в возрасте 50 лет. Как видно из рисунка, при малых однократных дозах облучения избыточный и атрибутивный риски не превышают 0,1 (10 %) и практически совпадают. С ростом дозы различие в рисках становится весьма существенным. Так, **ERR** достигает значения 0,5 (50 %), а атрибутивный риск $AR=0,34$ (34 %). Согласно (1.2.1), с возрастом избыточный риск падает. Также уменьшается и атрибутивный риск.

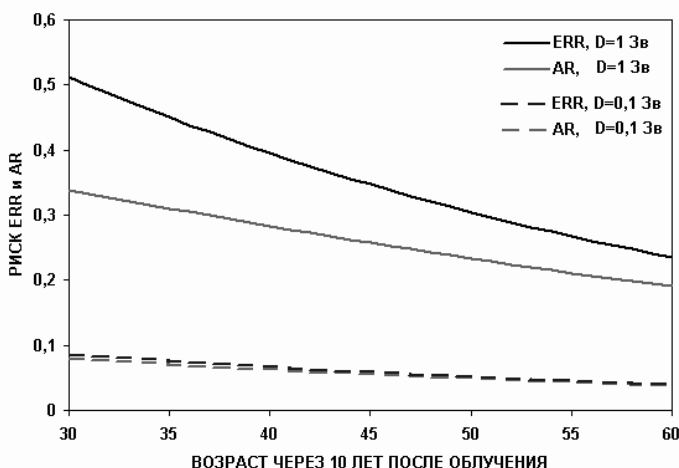


Рис. 1.2.2. Зависимость ERR и AR от возраста спустя 10 лет после облучения дозами 0,1 и 1,0 Зв (солидные раки)

Для лейкозов модель UNSCEAR-94 дает риск в виде избыточного абсолютного риска **EAR** (показатель на 100 тыс. чел.), который следующим образом зависит от дозы облучения, возраста при облучении и времени t , прошедшего со времени облучения:

$$EAR(D, g, t) = \frac{D}{D_0(g)} \left(1 + \frac{D}{1,27} \right) \cdot \exp \left(-\frac{t-25}{\tau(g)} \right) \quad (1.2.2),$$

где значения параметров D_0 и τ зависят от возраста при облучении g . Эти зависимости приведены в табл. 1.2.1. Для лейкозов риск квадратичным образом зависит от дозы D .

Таблица 1.2.1.

*Значения параметров избыточного абсолютного риска
EAR лейкозов в модели UNSCEAR-94*

g, лет	D_0 , Зв		τ , год	
	мужчины	женщины	мужчины	женщины
0–19	0,300	0,152	5,88	14,3
20–39	0,208	0,103	7,69	33,3
> 40	0,076	0,038	14,3	33,3

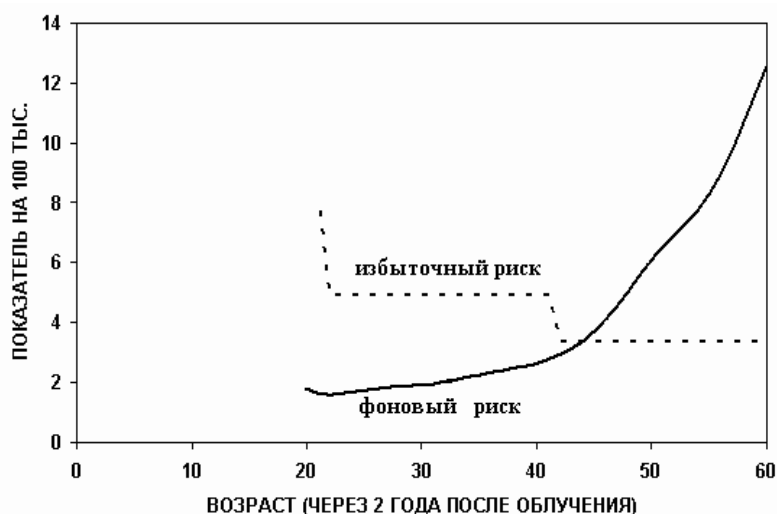


Рис. 1.2.3. Показатели фонового риска лейкозов (сплошная кривая) и избыточного абсолютного риска EAR через два года (латентный период) после облучения дозой 50 мЗв. Избыточный абсолютный риск со временем после облучения уменьшается по экспоненциальному закону (1.2.2)

Латентный период для лейкозов принят равным 2 годам. Как следует из модели (1.2.2), риск с течением времени уменьшается. В случае лейкозов для расчета атрибутивного риска необходимо привлекать данные о фоновой заболеваемости лейкозами. Для иллюстрации модели рис-

ка (1.2.2) на рис. 1.2.3 приведены фоновые показатели заболеваемости лейкозами и избыточный абсолютный риск **EAR** при дозе облучения 50 мЗв через два года после облучения. Недостатком этой модели является ее скачкообразная зависимость от возраста при облучении. При расчетах атрибутивного риска в дальнейшем использовались средние российские показатели заболеваемости лейкозом за 2005 г.

Алгоритм расчета атрибутивного риска при пролонгированном облучении

Как следует из моделей рисков (1.2.1) и (1.2.2), при однократном облучении избыточный относительный риск зависит от дозы облучения и возраста при облучении, а для лейкозов – и от времени, прошедшего после облучения. Поскольку работы в условиях планируемого повышенного облучения могут выполняться в течение нескольких лет, приведем алгоритм расчета риска для такого режима облучения. При равномерном облучении в течение нескольких лет риски от ежегодного облучения суммируются с учетом дозы и возраста при облучении. В этом случае изменение индивидуального избыточного относительного риска с возрастом будет описываться обыкновенным дифференциальным уравнением с запаздывающим параметром (латентный период):

$$\frac{dERR(u)}{du} = ERR(D(u - T_L), u - T_L) \quad (1.2.3),$$

где **ERR(u)** – избыточный относительный риск индивидуума в возрасте **u** на данный момент времени; **D(u-T_L)** – доза облучения, полученная в возрасте при облучении **g=u-T_L**. В качестве запаздывающего параметра в уравнение входит латентный период **T_L**. После замены переменной **u-T_L=g** уравнение (1.2.3) интегрируется:

$$ERR(u) = \int_{g_0}^{u-T_L} ERR(D(g), g) dg \quad (1.2.4),$$

где g_0 – возраст, при котором работник впервые подвергся облучению. Таким образом, интеграл (1.2.4) дает значение избыточного относительного риска работника, достигшего возраста u в текущем году. Из (1.2.4) также следует, что в настоящий момент риск определяется дозами облучения, которые работник накопил 10 и более лет назад.

Поскольку для каждого работника режим облучения или зависимость $d(g)$ индивидуальны, уравнение (1.2.4) может быть проинтегрировано только численным методом. Вводя дискретный шаг по возрасту в 1 год, в численном виде интеграл (1.2.4) записывается в виде суммы следующим образом:

$$ERR(u) = a \cdot \sum_{g=g_0}^{g=u-T_L} D_g \cdot \exp(b \cdot (g - 25)) \quad (1.2.5),$$

где g_0 , g , u – дискретные величины с шагом в 1 год; D_g – доза облучения, полученная в возрасте g .

Таким образом, для расчета индивидуального избыточного относительного риска ERR работника, направляемого на выполнение работ в условиях повышенного облучения, необходимо иметь данные о предполагаемых планируемых дозах облучения и возраст работника u . При наличии таких данных полный риск ERR заболевания солидными раками на текущий момент определяется по формуле (1.2.5). Несколько упрощенный вариант расчета ERR приведен в [IAEA, 1996].

После того как найдено значение $ERR(u)$, находится значение индивидуального атрибутивного риска $AR(u)$ по формуле:

$$AR = \frac{ERR}{1 + ERR} \cdot 100\% \quad (1.2.6).$$

Аналогичный алгоритм использовался и при расчете атрибутивного риска заболевания лейкозами.

Риск от облучения в нормальных условиях. Солидные раки

В первую очередь рассмотрим, каковы риски у профессионального работника в условиях нормальной эксплуатации источников излучения. В нормальных условиях НРБ-99/2009 допускают ежегодную дозу облучения 20 мЗв. Примем, что работник работает с 20 до 60 лет и ежегодно получает дозу 20 мЗв. Риски за пределами этого возраста не рассматриваются. Для этого работника на рис. 1.2.4 представлена зависимость от возраста его индивидуального избыточного относительного риска (ERR) и атрибутивного риска (AR). Согласно современным представлениям [IAEA, 1996], атрибутивный риск интерпретируется как вклад облучения в развитие онкологического заболевания (доля «вины» радиации). Величина атрибутивного риска используется при определении компенсационных выплат по случаю онкологических заболеваний работников атомной промышленности Англии [Wakeford et al., 1998].

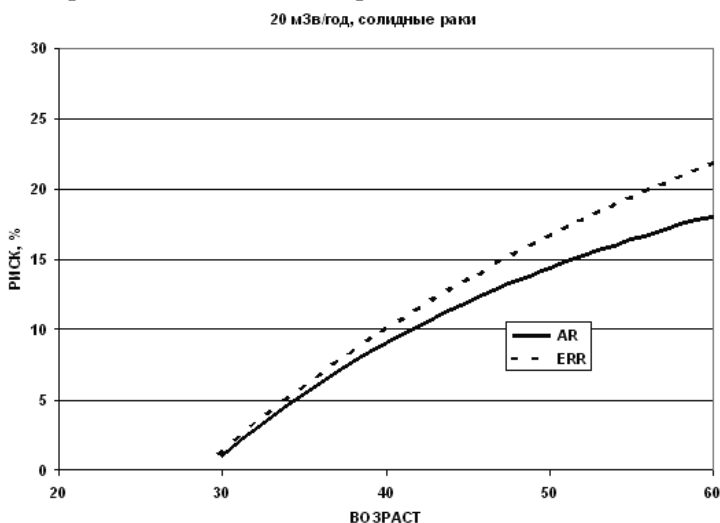


Рис. 1.2.4. Зависимость от возраста индивидуального избыточного относительного риска (ERR) и атрибутивного риска (AR) работника за период работы с 20 до 60 лет при облучении дозой 20 мЗв/год

Как видно из рисунка, атрибутивный риск нелинейно зависит от возраста, в то время как накопленная доза облучения линейно нарастает с возрастом со скоростью 20 мЗв/год. К 60 годам атрибутивный риск достигает 18 %. Радиационный риск из-за латентного периода начинает проявляться с 30 лет. Если использовать градацию по группам риска [Иванов В.К. и др., 2006а], то в 42 года работник попадает в группу повышенного потенциального риска ($AR \gg 10\%$).

Таким образом, расчеты показывают, что в условиях нормальной эксплуатации источников излучения, но при критических дозах облучения индивидуальный атрибутивный риск не превышает 20 %. Этот уровень риска будет использоваться в дальнейшем в качестве реперного при анализе рисков в условиях планируемого повышенного облучения. Из модели риска (1.2.1) также следует, что с возрастом как ERR, так и AR уменьшаются – облучение в старшем возрасте приводит к меньшим рискам для здоровья (см. рис. 1.2.2).

На рис. 1.2.5 показана динамика величины атрибутивного радиационного риска солидных раков при ежегодном облучении персонала дозой 2 мЗв в возрасте от 20 до 60 лет.

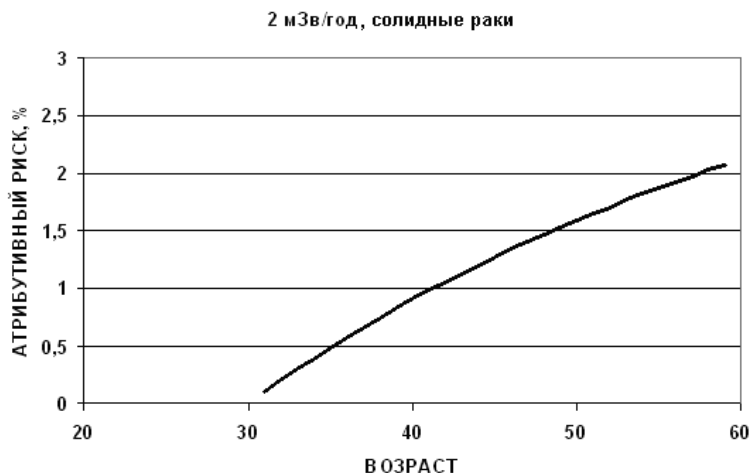


Рис. 1.2.5. Зависимость от возраста атрибутивного риска (AR) работника за период работы с 20 до 60 лет при облучении дозой 2 мЗв/год

Следует отметить, что примерно в 2 мЗв оценивается средняя годовая доза облучения персонала Госкорпорации «Росатом» в последние годы. Из рис. 1.2.5 следует, что величина атрибутивного риска при таком режиме облучения не превышает 2-3 %, что является, безусловно, приемлемым уровнем риска радиационного воздействия по всем современным международным стандартам.

Риск от облучения в нормальных условиях. Лейкозы

В случае лейкозов при расчете атрибутивного риска необходимо привлекать фоновые (спонтанные) показатели заболеваемости лейкозами. Следует отметить, что спонтанная частота заболеваемости лейкозами невелика и вероятность этого события составляет примерно 10^{-4} в год. Кроме того, согласно (1.2.2), риск от однократного облучения экспоненциально убывает со временем после облучения. Так, согласно табл. 1.2.1, при облучении в возрасте 20-39 лет риск EAR уменьшается примерно в три раза через 7 лет.

Для иллюстрации специфики рисков по лейкозам рассмотрим три режима облучения: 20 мЗв/год, 10 мЗв/год и 2 мЗв/год. Период работы, как и в случае солидных раков, – с 20 до 60 лет.

На рис. 1.2.6 представлена зависимость атрибутивного риска от возраста для указанных трех режимов облучения. Как и следовало ожидать, с увеличением дозы облучения риск возрастает. Качественно все три зависимости ведут себя одинаково: в первые 5-10 лет риски возрастают, затем с 30 до 40 лет наблюдается стабилизация риска, а после 40 лет риски уменьшаются. Как следует из рисунка, при критическом режиме облучения в 20 мЗв/год, максимальные риски достигают 85 %, при облучении в 10 мЗв/год риск доходит до 74 %, а при 2 мЗв/год (уровень облучения в современной атомной промышленности) риск составляет немногим менее 40 %. Как уже было сказано, после 40 лет, несмотря на продолжающееся об-

лучение, атрибутивный риск снижается и при критическом режиме облучения падает практически до 50 %.

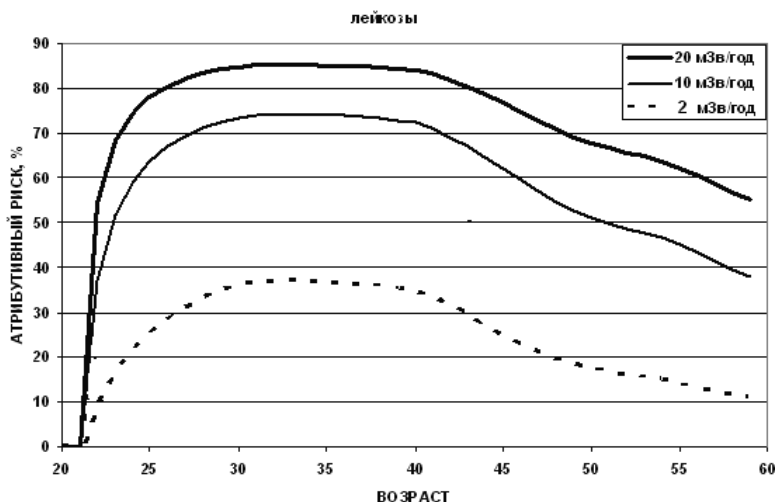


Рис. 1.2.6. Зависимость атрибутивного риска лейкозов от возраста для трех режимов облучения в период работы от 20 до 60 лет

Приведенные результаты расчета показывают, что при облучении в возрасте старше 40 лет риск по лейкозам меньше, чем при облучении в возрасте от 30 до 40 лет.

Риск при планируемом повышенном облучении.

Солидные раки

Рассмотрим три сценария работы в условиях планируемого повышенного облучения. Предположим, что имеется три кандидата для проведения работ в течение года, которые отличаются возрастом: 30, 40 и 50 лет. Планируемая доза облучения – 200 мЗв. На рис. 1.2.7 представлена для этого сценария зависимость атрибутивного риска от возраста. Как следует из рисунка, максимальному риску подвергается кандидат в возрасте 30 лет – риск для него составляет около 7 %. По мере

увеличения возраста кандидатов атрибутивный риск падает и для кандидата, облучившегося в возрасте 50 лет, составляет немногим более 4 %. Таким образом, чем старше по возрасту кандидат, привлекаемый к работам, тем меньшему риску он подвергается при выполнении работ в условиях планируемого повышенного облучения.

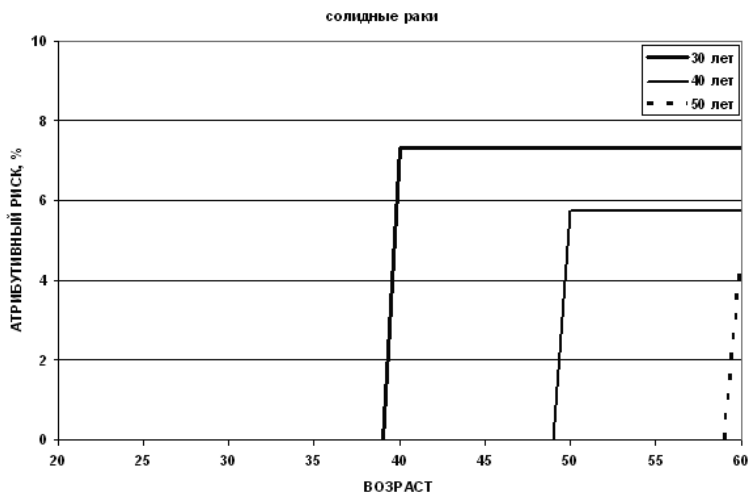


Рис. 1.2.7. Атрибутивный риск по солидным ракам для трех кандидатов в возрасте 30, 40 и 50 лет, привлекаемых к выполнению работ в течение года в условиях планируемого повышенного облучения. Планируемая доза облучения – 200 мЗв

Риск при планируемом повышенном облучении. Лейкозы

Для рисков по лейкозам рассмотрим такие же сценарии, как и в пункте 5.3. На рис. 1.2.8 представлены результаты расчета рисков по указанным сценариям. В случае лейкозов при дозах облучения в 200 мЗв риски достигают 90 % для кандидата в возрасте 30 лет, что согласуется с расчетами, приведенными на рис. 1.2.5. С позиции групп риска [Иванов В.К. и др., 2004], кандидаты в возрасте от 30 до 45 лет попадают в группу высокого потенциального риска ($AR > 75\%$). Лица старше 45 лет попадают после выполнения

работ в условиях повышенного облучения в группу повышенного потенциального риска ($50 \% < AR < 75 \%$). Поскольку риски по лейкозам убывают со временем, то скажем, лица в возрасте 30-45 лет через 5-10 лет переходят в группу повышенного потенциального риска, а через 10-15 лет покидают и эту группу ($AR < 50 \%$).

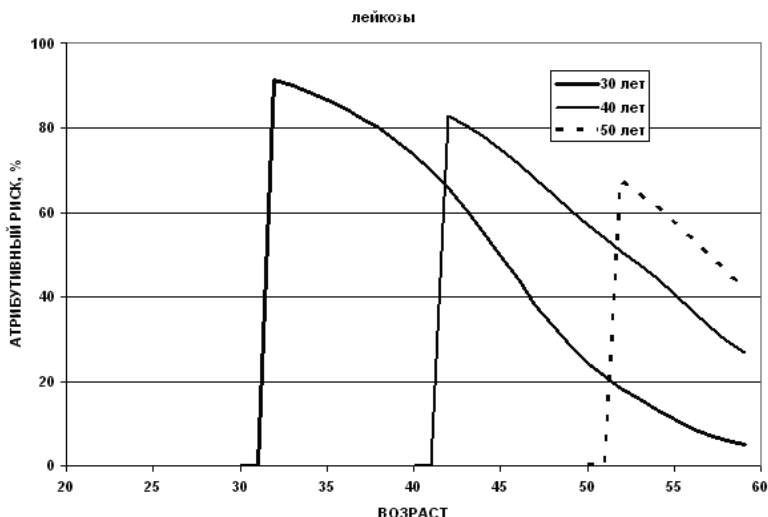


Рис. 1.2.8. Атрибутивный риск по лейкозам для трех кандидатов в возрасте 30, 40 и 50 лет, привлекаемых к выполнению работ в течение года в условиях планируемого повышенного облучения. Планируемая доза облучения 200 мЗв

Итак, расчеты атрибутивного риска по лейкозам показывают, что, как и в случае солидных раков, лица, привлекаемые к выполнению работ в условиях повышенного облучения в более старшем возрасте, подвергаются меньшим рискам.

Риск при работе в нормальных условиях и в условиях планируемого повышенного облучения

Очевидно, что лица, привлекаемые к работам в условиях планируемого повышенного облучения, являются про-

фессионалами и до этого подвергались облучению в нормальных условиях работы с источниками излучения. Как было показано выше, атрибутивный риск на текущий момент зависит от всей предыстории облучения. Этот факт, по-видимому, следует учитывать при оценке рисков при работе в условиях повышенного облучения. В связи с этим рассмотрим сценарий, когда работник с 20 до 60 лет подвергается в нормальных условиях работы облучению в 5 мЗв/год, а в 40 лет в течение года выполнял работы в условиях повышенного планируемого облучения и получил дозу 200 мЗв. Результаты расчетов риска для этого сценария представлены на рис. 1.2.9. При таком режиме облучения работник попадает в группу повышенного риска в возрасте 27 лет. После работы в условиях повышенного облучения атрибутивный риск возрастает до 85 % (группа высокого потенциального риска). Примерно через 7 лет риск, несмотря на продолжающееся облучение, опускается ниже 75 %, и работник снова оказывается в группе повышенного риска. К

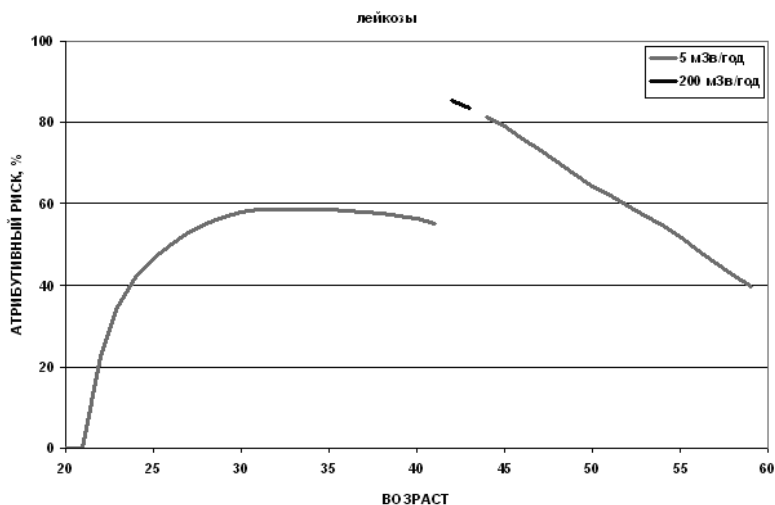


Рис. 1.2.9. Атрибутивный риск по лейкозам при сочетании работ в нормальных условиях и в условиях планируемого повышенного облучения

55 годам он выходит и из этой группы. Сопоставление рис. 1.2.8 и 1.2.9 показывает, что учет предыстории облучения практически не сказывается на максимальном значении атрибутивного риска. Это связано в первую очередь с соотношением доз облучения в нормальных условиях работы (5 мЗв/год) и в условиях повышенного облучения (200 мЗв/год). При сопоставимых дозах картина поведения рисков изменится.

Расчет избыточного абсолютного риска EAR

Расчет величины ежегодного избыточного абсолютного риска **EAR** проводился с использованием формул (1.2.1) и (1.2.2). Формула для расчета **EAR** имеет вид:

$$EAR(u, g, D) = ERR(D, g) \cdot m(u),$$

где **u** – текущий возраст, **m(u)** – фоновая заболеваемость (смертность). На основе данных [Чиссов В.И. и др., 2007], построена зависимость онкологической смертности (солидные раки, лейкозы) от заболеваемости. Эти зависимости в области возраста 20-70 лет с достаточной точностью описываются линейной функцией, вид которых представлен на рис. 1.2.10 (лейкозы) и 1.2.11 (солидные раки). R^2 – величина достоверности аппроксимации. Аппроксимация использовалась для перерасчета онкозаболеваемости в онкосмертность.

По последним данным, полученным при исследовании когорты LSS, обнаружено, что облучение приводит к увеличению числа сердечно-сосудистых заболеваний при дозах свыше 500 мЗв [ICRP Publication 103, 2007]. В связи с этим фактом, в данной работе проведен также расчет избыточного абсолютного риска (EAR) для этого класса заболеваний (смертей). EAR здесь рассчитывался так же, как и для солидных раков, за исключением того, что латентный период определялся не временем после облучения, а величиной накопленной дозы. При накопленной дозе облучения менее 500 мЗв EAR=0, при дозе 500 и более мЗв – EAR>0.

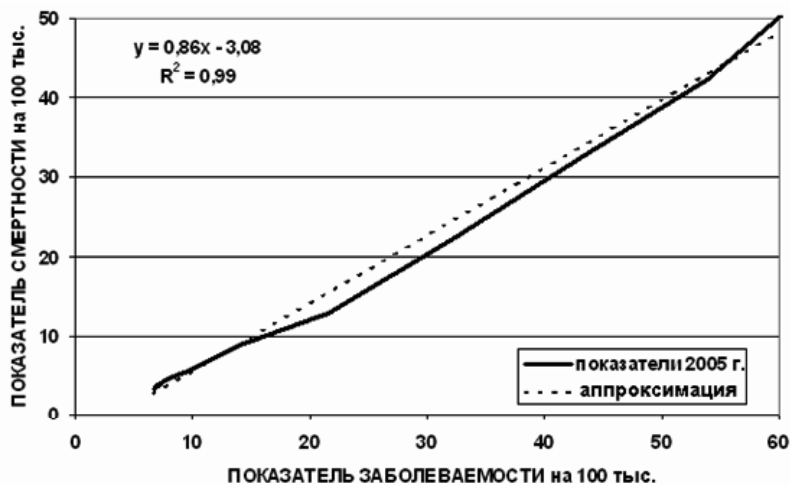


Рис. 1.2.10. Зависимость показателей смертности от показателя заболеваемости (лейкозы, Россия, 2005 г.). Пунктиром показан линейный тренд: $y=0,86x-3,08$. Достоверность аппроксимации – 0,99

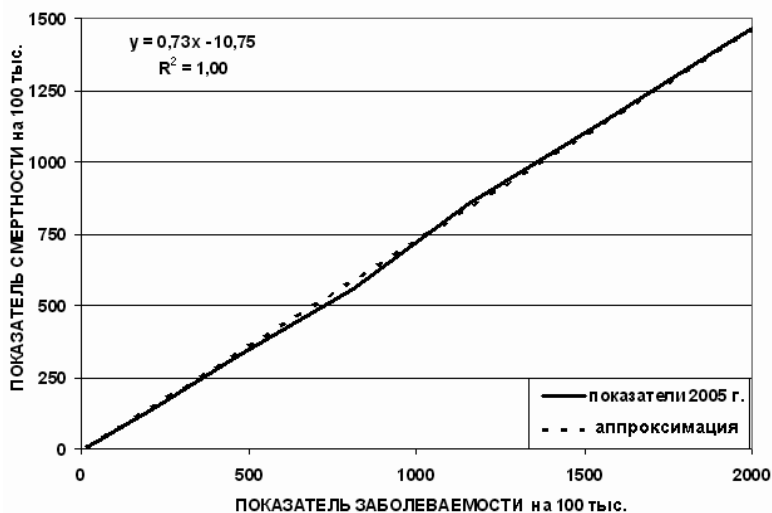


Рис. 1.2.11. Зависимость показателей смертности от показателя заболеваемости (солидные раки, Россия, 2005 г.). Пунктиром показан линейный тренд: $y=0,73x-10,75$. Достоверность аппроксимации – 1,0

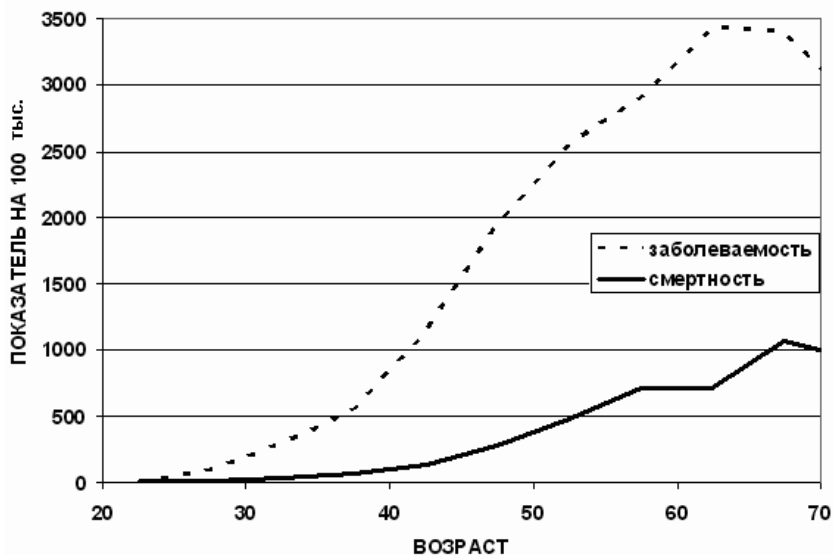


Рис. 1.2.12. Зависимость показателей заболеваемости и смертности от заболеваний системы кровообращения от возраста (НРЭР, 2007 г.)

Значения параметра ERR $a = 0,45/4$ для мужчин и $0,77/4$ для женщин. Зависимость от возраста при облучении g отсутствует. На рис. 1.2.12 представлена зависимость показателей заболеваемости (смертности) системы кровообращения по данным Национального радиационно-эпидемиологического регистра (НРЭР) для возраста 20-70 лет [Иванов В.К., Цыб А.Ф., 2002]. Для этого класса заболеваний линейная зависимость между заболеваемостью и смертностью выражена слабо и при расчетах EAR использовались фактические показатели заболеваемости (смертности).

Далее на рис. 1.2.13–1.2.16 представлена зависимость EAR (заболеваемость, смертность) от возраста при облучении работника дозой 20 мЗв/год в возрасте 18-60 лет: для солидных раков, лейкозов, заболеваний системы кровообращения и всех трех классов заболеваний.

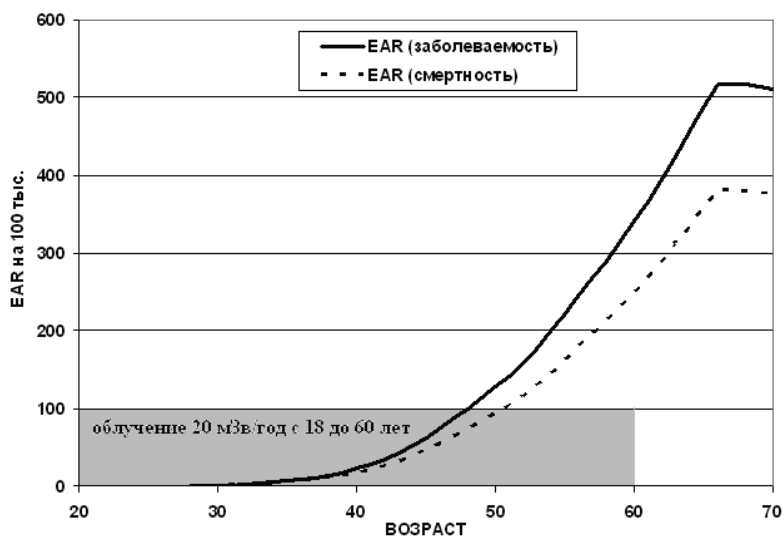


Рис. 1.2.13. Зависимость от возраста избыточного абсолютного риска EAR для солидных раков. Доза облучения – 20 мЗв/год с 18 до 60 лет

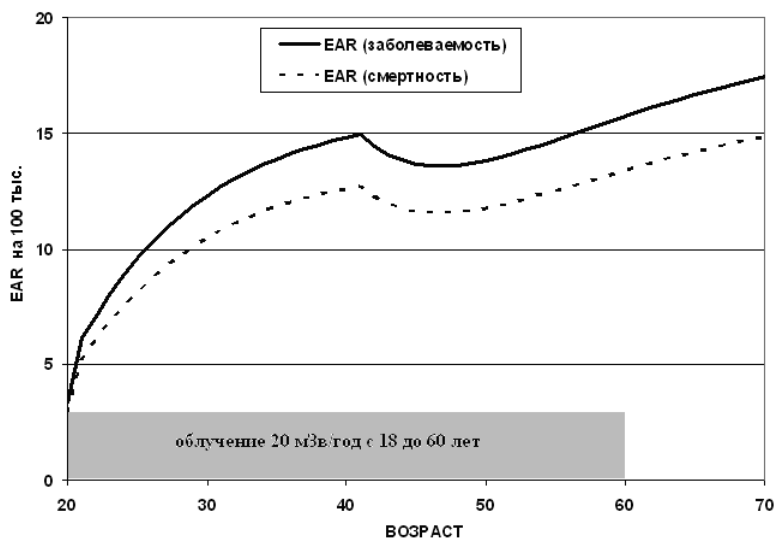


Рис. 1.2.14. Зависимость от возраста избыточного абсолютного риска EAR для лейкозов. Доза облучения – 20 мЗв/год с 18 до 60 лет

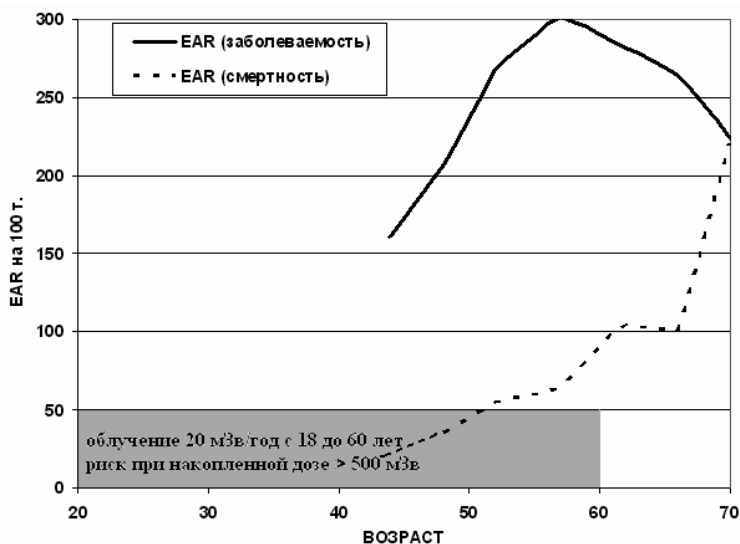


Рис. 1.2.15. Зависимость от возраста избыточного абсолютного риска EAR для заболеваний системы кровообращения. Доза облучения – 20 мЗв/год с 18 до 60 лет

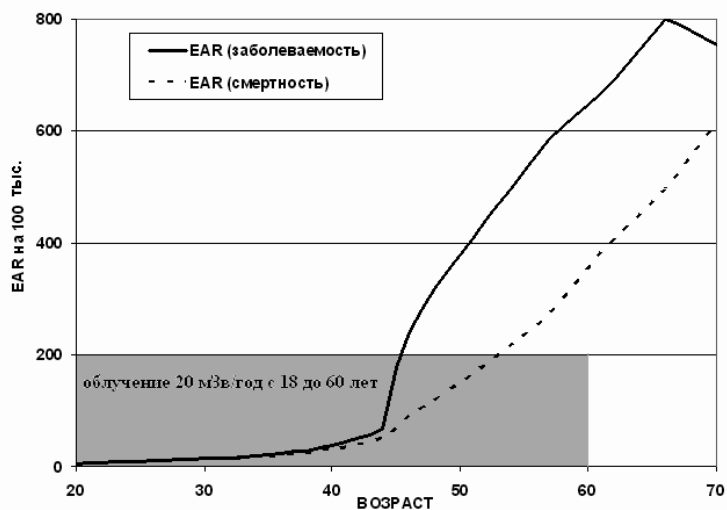


Рис. 1.2.16. Зависимость от возраста избыточного абсолютного риска EAR для всех трех классов заболеваний. Доза облучения – 20 мЗв/год с 18 до 60 лет

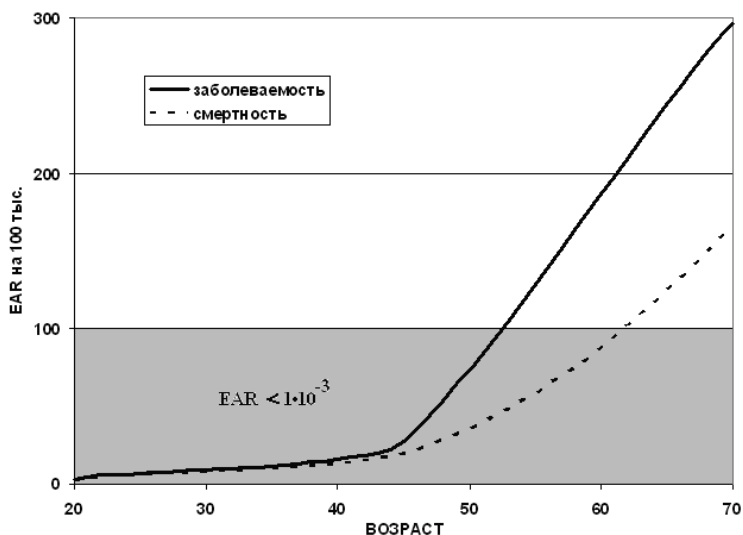


Рис. 1.2.17. Зависимость от возраста *усредненного по периоду облучения* избыточного абсолютного риска EAR для всех трех классов заболеваний. Доза облучения – 20 мЗв/год с 18 до 60 лет. Заштрихованная область: EAR меньше $1 \cdot 10^{-3}$

Как видно из рис. 1.2.17, при рассматриваемом режиме облучения (20 мЗв/год) величина избыточного абсолютного риска превышает значение 10^{-3} (НРБ-99/2009, п. 2.3).

Формирование групп потенциального радиационного риска среди персонала ПО «Маяк»

В настоящее время в систему АРМИР [Иванов В.К. и др., 2006в] (автоматизированное рабочее место по оценке индивидуального риска) включено 9900 человек из персонала ПО «Маяк», состоящего на ИДК. На рис. 1.2.18–1.2.21 приведены основные характеристики этой группы персонала ПО «Маяк». Было установлено, что к группе потенциального риска (ГПР) по международным стандартам «дозовой матрицы» следует отнести 881 человека (8,9 % от всей численности), к группе высокого потенци-

ального риска (ГВПР) – 213 человек (2,1 % от всей численности). Из этих 213 человек 112 человек относятся к ГВПР по солидным ракам.

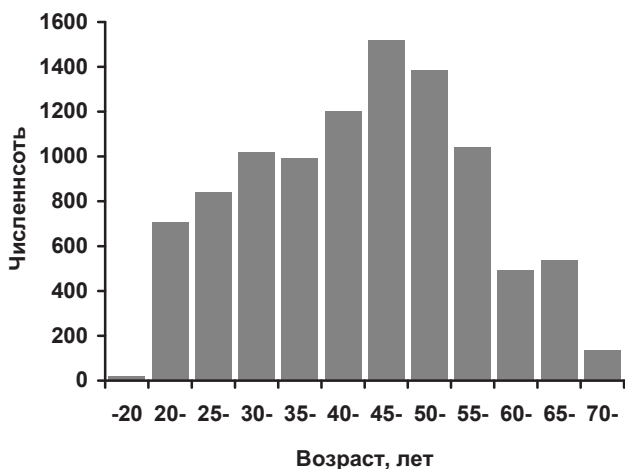


Рис. 1.2.18. Возрастное распределение персонала ПО «Маяк». Средний возраст – 44 года

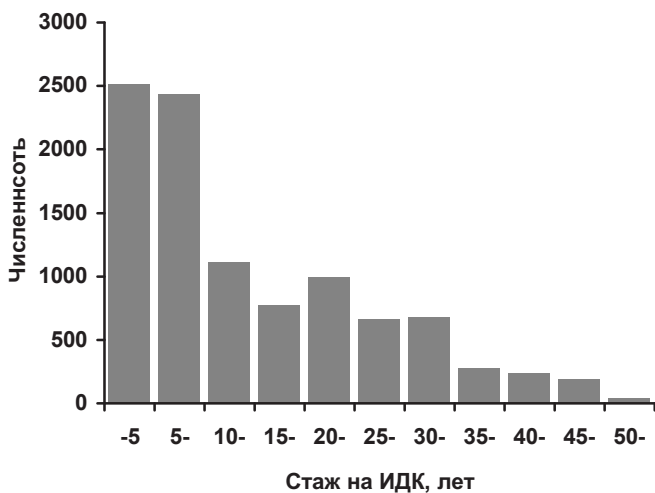


Рис. 1.2.19. Распределение по стажу персонала ПО «Маяк». Средний стаж – 14 лет

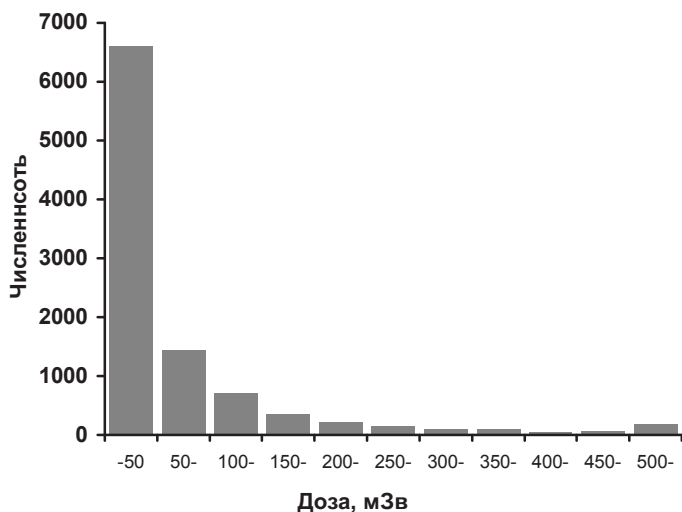


Рис. 1.2.20. Распределение по накопленной дозе персонала ПО «Маяк». Средняя накопленная доза – 70 мЗв

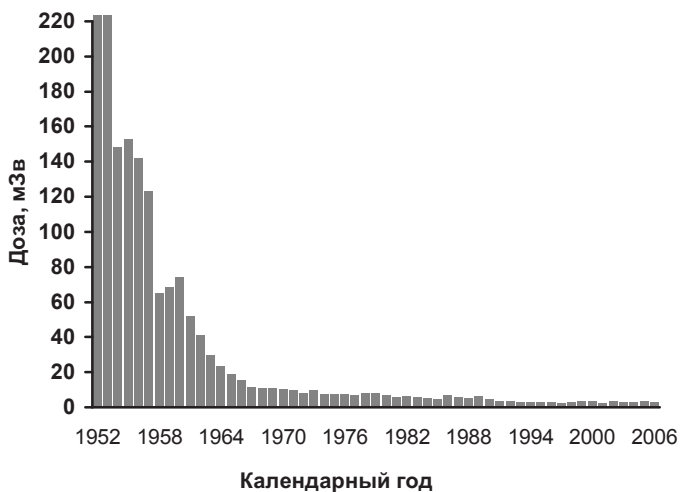


Рис. 1.2.21. Динамика средней годовой дозы персонала ПО «Маяк». Средняя доза в 2006 г. – 2,8 мЗв

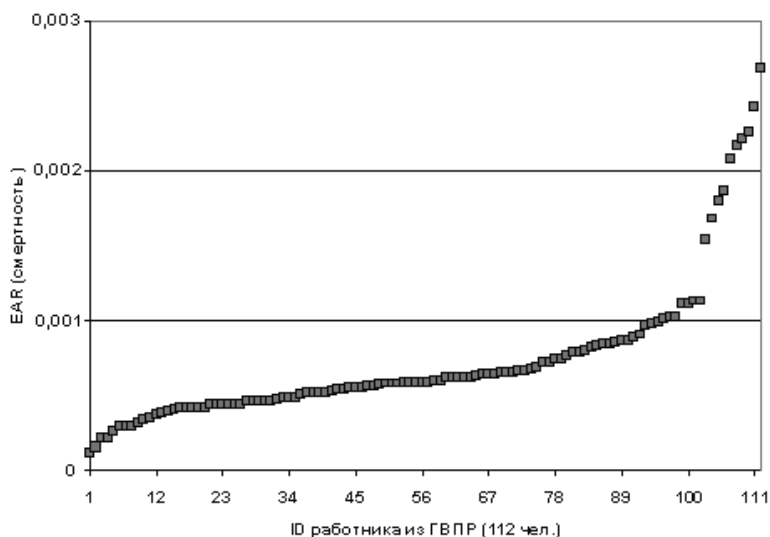


Рис. 1.2.22. Индивидуальная величина EAR для 112 человек ПО «Маяк», входящих в ГВПР в 2008 г. по солидным ракам

Как видно из рис. 1.2.22, только для 17 человек из 112, входящих в ГВПР по солидным ракам, величина избыточного абсолютного риска (п. 2.3, НРБ-99/2009) превышает к 2008 г. значение 10^{-3} .

Используя стандарт НРБ-99/2009 (п. 2.3), сформируем две группы риска:

- группу потенциального риска (ГПР1), в которую входит персонал с превышением индивидуальной оценки EAR величины 10^{-3} в течение периода работы на ИДК;
- группу высокого потенциального риска (ГВПР1), в которую входит персонал с превышением среднего значения EAR величины 10^{-3} в течение периода работы на ИДК.

Для определения численности ГПР1 и ГВПР1 получена оценка EAR и среднего EAR для каждого работника ПО «Маяк» (9900 чел.), состоящего на ИДК. Установлено, что в ГПР1 входит 372 человека (средний возраст – 68 лет, средняя накопленная доза – 0,6 Зв), а в ГВПР1 (табл. 1.2.2)

входит только 7 человек (средний возраст – 74 года, средняя накопленная доза – 2,4 Зв).

Таблица 1.2.2.

Данные о накопленной дозе и среднему EAR на 25 человек из 9900 работников ПО «Маяк» в 2008 г., 7 человек имеют превышение риска 10^{-3}

ID	№ це- ха	Пол	Год рождения	Накопленная доза	Среднее EAR (смертность)
8248	3	0	1934	3,03305	0,00126
13579	1	0	1932	2,18761	0,0011
4688	1	0	1935	2,63002	0,00106
4846	1	0	1935	2,49985	0,00106
8045	3	0	1930	2,0516	0,00104
8481	3	0	1937	2,46777	0,00102
8215	3	0	1936	2,37975	0,00101
7054	3	0	1937	2,14142	0,00086
3940	5	0	1938	2,03291	0,0008
8038	3	0	1933	1,67556	0,00076
4217	5	0	1939	1,67017	0,00065
7037	3	0	1935	1,52429	0,00063
4267	5	0	1937	1,55649	0,0006
4189	5	0	1937	1,41416	0,00058
6822	3	0	1941	1,44755	0,00058
7594	3	0	1935	1,39169	0,00058
3985	5	0	1932	1,22589	0,00056
12615	6	0	1935	1,33082	0,00054
6996	3	0	1939	1,31549	0,0005
7080	3	0	1940	1,26692	0,0005
4172	5	0	1940	1,22783	0,00049
7079	3	0	1940	1,21697	0,00049
7659	3	0	1939	1,259	0,00049
10071	3	0	1937	1,20769	0,00048
2841	2	0	1936	1,08494	0,00047

Следует еще раз отметить, что для 372 человек точечная оценка EAR в течение периода работы на ИДК превы-

шает величину 10^{-3} , а для 7 человек величину 10^{-3} превышает усредненная оценка EAR за период работы на ИДК. Вышеперечисленные работники (ГВПР1) получили основное облучение в 50-60-х годах, т.е. в первые годы работы ПО «Маяк». Превышение значений EAR величины 10^{-3} (группа ГПР1 – 372 человека) также относится к этому периоду работы ПО «Маяк».

В Основах госполитики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности РФ на период до 2025 года, утвержденных Президентом РФ, отмечается, что к основным принципам этой политики относится «реализация концепции социально приемлемого риска». Понятно, что эта концепция может быть реализована только на основе новой технологической платформы радиационной защиты персонала и населения, учитывающей современные международные стандарты, а также безусловном выполнении требований Российских НРБ. В связи с этим необходимо дальнейшее развитие и совершенствование не только системы дозовых ограничений, но и системы управления радиационными рисками профессионального облучения.

1.3. Сравнительный анализ современных моделей оценки радиационных рисков МКРЗ и НКДАР ООН

В новых рекомендациях МКРЗ (Публикация 103) обозначены основные направления рискового подхода в задачах радиационной защиты [ICRP Publication 103, 2007]. В частности подчеркивается, что процесс оптимизации защиты может быть реализован для ситуаций облучения, которые можно считать обоснованными. Предлагается, в частности, оптимизировать контролируемое аварийное и существующее облучение введением референтных уровней по дозе или риску. Для медицинского облучения также рекомендуется использовать диагностический референтный уровень, а в ситуациях планируемо-

го облучения должны быть использованы граничные риски для учета потенциального облучения.

Поэтому большой интерес в настоящее время представляет анализ современных моделей радиационного риска, предложенных ведущими международными организациями (НКДАР ООН и МКРЗ).

Основным неблагоприятным фактором воздействия радиации на здоровье человека является, как известно, увеличение вероятности или риска возникновения онкологического заболевания. В зависимости от конкретной ситуации принято использовать ряд основных и дополнительных (характеризующих радиационное воздействие) показателей риска.

В отсутствие облучения основным показателем риска является показатель фоновой или спонтанной онкологической смертности или заболеваемости λ_0 (число онкологической смертности или заболеваемости в год на 100 тыс. человек). Воздействие радиации приводит к увеличению λ_0 на дополнительную величину λ_R . Таким образом, полный показатель смертности или заболеваемости раком λ будет суммой фонового и радиационного показателей:

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_R \quad (1.3.1).$$

Фоновые показатели смертности и заболеваемости раком локализации l зависят от возраста a и пола s : т.е. $\lambda_0 = \lambda_0(a, l, s)$, а радиационный риск в общем случае зависит от дозы облучения D , текущего возраста a , локализации l , пола s и возраста на момент облучения g : $\lambda_R = \lambda_R(g, a, l, s, D)$. Отсюда (1.3.1) примет вид:

$$\lambda(g, a, l, s, D) = \lambda_0(a, l, s) + \lambda_R(g, a, l, s, D).$$

Радиогенный риск λ_R представляется в двух формах: аддитивной и мультипликативной. В аддитивной модели полный риск есть:

$$\lambda = \lambda_0 + 10^5 \cdot EAR,$$

где EAR – избыточный абсолютный риск (Excess Absolute Risk), обусловленный только радиационным облучением.

В мультипликативной модели полный риск записывается в виде:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot (1 + ERR) \quad (1.3.2),$$

где безразмерная величина ERR есть избыточный относительный риск (Excess Relative Risk) или отношение избыточного абсолютного риска к фоновому показателю:

$$ERR = \frac{10^5 \cdot EAR}{\lambda_0} \quad (1.3.3).$$

После облучения радиационный риск, как EAR , так и ERR , может реализоваться только через определённое время – латентный период T_{LS} .

Модель МКРЗ-2007

Модель МКРЗ-2007 [ICRP Publication 103, 2007] для оценки рисков заболеваемости и смертности солидными раками является моделью D.L. Preston [Preston et al., 2007]. Рассмотрим эту модель подробнее.

Заболеваемость. Для получения модели риска в МКРЗ-2007 использовалась в основном когорта LSS ([ICRP Publication 103, 2007] A108). Для переноса модели рисков на другие популяции величина избыточного абсолютного риска заболеваемости солидными раками в модели МКРЗ 2007 получается как взвешенное среднее так называемых аддитивной и мультипликативной моделей. Аддитивная модель даёт величину риска в форме EAR , мультипликативная модель даёт величину риска в форме ERR . Итоговое выражение для абсолютного избыточного риска выглядит следующим образом:

$EAR^{inc} = p \cdot ERR^{mult} \cdot \lambda_0 + (1 - p) \cdot EAR^{add}$ или по-другому, с учетом (1.3.3):

$$EAR^{inc} = p \cdot EAR^{mult} + (1 - p) \cdot EAR^{add} \quad (1.3.4).$$

Здесь p – весовой множитель, зависящий от локализации опухоли ([ICRP Publication 103, 2007] A140).

Мультипликативная и аддитивная модели в работе D.L. Preston ([Preston et al., 2007], с. 5) даётся в форме $p(D) \cdot \varepsilon(g, s, a)$, где $p(D)$ описывает вид дозовой зависимости, а $\varepsilon(g, s, a)$ описывает изменение риска в зависимости от пола s , возраста при облучении g , а также возраста дожития a . В МКРЗ-2007 принята линейная зависимость доза-эффект для риска рака ([ICRP Publication 103, 2007] A173-A177), а значит $p(D) = \beta \cdot D$.

Формула в статье D.L. Preston ([Preston et al., 2007] с. 6, ф. (1)) даёт вид $\varepsilon(g, s, a)$:

$$\varepsilon(g, s, a) = \theta_s \cdot \exp[\alpha \cdot g + \omega \cdot \ln(a)].$$

Отсюда следует, что в рамках модели МКРЗ-2007 избыточный риск ER , как абсолютный, так и относительный, можно получить из общей формулы:

$$ER(g, s, a, D) = \beta \cdot \theta_s \cdot D \cdot \exp[\alpha \cdot g + \omega \cdot \ln(a)] \quad (1.3.5).$$

В МКРЗ-2007 для величины избыточного абсолютного риска произведение $\beta \cdot \theta_s$ даётся в форме избытка раковой заболеваемости на 10 тыс. человек в год на Гр в возрасте 70 лет при облучении в 30 лет ([ICRP Publication 103, 2007] табл. A4.7). Учитывая это, а также то, что величины β и α зависят от локализации опухоли, получим, исходя из (1.3.5), выражение для абсолютного избыточного риска, соответствующего аддитивной модели МКРЗ-2007:

$$EAR^{add}(g, a, l, s, D) = D \cdot \frac{\beta_{add}(l, s)}{10^4} \cdot \left(\frac{a}{70}\right)^{\omega_{add}(l)} \cdot \exp[\alpha_{add}(l) \cdot (g - 30)]. \quad (1.3.6)$$

Аналогично избыточному абсолютному риску, для избыточного относительного риска в МКРЗ-2007 произведение $\beta \cdot \theta_s$ даётся в форме ERR на Гр в возрасте 70 лет при облучении в 30 лет ([ICRP Publication 103, 2007] табл. A4.6). Учитывая это, а также формулу (1.3.3) и то, что величины β и α зависят от локализации опухоли, получаем, исходя из (1.3.5), выражение для абсолютного избыточного риска, со-

ответствующего мультипликативной модели МКРЗ-2007:

$$EAR^{mult}(g, a, l, s, D) = \frac{\lambda_0^{inc}(l, s, a)}{10^5} \cdot D \cdot \beta_{mult}(l, s) \cdot \left(\frac{a}{70}\right)^{\omega_{mult}(l)} \cdot \exp[\alpha_{mult}(l) \cdot (g - 30)] \quad (1.3.7).$$

В формулах (1.3.6) и (1.3.7): l – локализация опухоли; s – пол; g – возраст при облучении; a – возраст дожития; D – доза облучения; β_{mult} , ω_{mult} , α_{mult} – параметры мультипликативной модели; β_{add} , ω_{add} , α_{add} – параметры аддитивной модели. Также в формулах (1.3.6) и (1.3.7) параметры β равны соответствующему произведению $\beta \cdot \theta_s$ в формуле (1.3.5) и зависят от пола и локализации опухоли. Остальные параметры зависят только от локализации.

В МКРЗ-2007 параметры α_{mult} и α_{add} непосредственно не приводятся. Однако там приведены величины, которые мы обозначим как γ_{mult} и γ_{add} . Эти параметры даются в виде процента изменения ERR^{mult} и EAR^{add} соответственно при увеличении возраста при облучении на десятилетие ([ICRP Publication 103, 2007] табл. А4.6, А4.7). Исходя из этого и вида формул (1.3.6) и (1.3.7), параметры α_{mult} и α_{add} можно вычислить по следующим формулам:

$$\alpha_{mult}(l) = \frac{1}{10} \cdot \ln\left(1 + \frac{\gamma_{mult}(l)}{100}\right);$$

$$\alpha_{add}(l) = \frac{1}{10} \cdot \ln\left(1 + \frac{\gamma_{add}(l)}{100}\right).$$

Параметры β_{mult} , ω_{mult} , γ_{mult} , β_{add} , ω_{add} , γ_{add} также можно найти ниже в табл. 1.3.1.

Латентный период для солидных раков в модели МКРЗ T_{LS} равен 10-ти годам. То есть в течение 10 лет после облучения избыточные риски, как по мультипликативной, так и по аддитивной моделям, принимаются равными нулю. Другими словами:

$$EAR^{mult}(g, a, l, s, D) = 0 \text{ и } EAR^{add}(g, a, l, s, D) = 0, \text{ если } a < g + T_{LS}.$$

Таблица 1.3.1.

Параметры модели риска заболеваемости от различных локализаций солидного рака для модели МКРЗ 2007

Локализация опухоли	Пол	β_{mult}	γ_{mult}	ω_{mult}	β_{add}	γ_{add}	ω_{add}
Все солидные	Муж.	0,35	-17	-1,65	43,20	-24	2,38
	Жен.	0,58			59,83		
Пищевод	Муж.	0,40	-17	-1,65	0,48	64	2,38
	Жен.	0,65			0,66		
Желудок	Муж.	0,23	-17	-1,65	6,63	-24	2,38
	Жен.	0,38			9,18		
Толстая кишка	Муж.	0,68	-17	-1,65	5,76	-24	2,38
	Жен.	0,33			2,40		
Печень	Муж.	0,25	-17	-1,65	4,18	-24	2,38
	Жен.	0,40			1,30		
Лёгкое	Муж.	0,29	+17	-1,65	6,47	1	4,25
	Жен.	1,36			8,97		
Молочная железа	Жен.	0,87	0	-2,26	10,9	-39	3,5
Яичник	Жен.	0,32	-17	-1,65	1,47	-24	2,38
Мочевой пузырь	Муж.	0,67	-17	-1,65	2,00	-11	6,39
	Жен.	1,10			2,77		
Щитовидная железа	Муж.	0,53	-56	0,00	0,69	-24	0,01
	Жен.	1,05			2,33		
Остальные солидные	Муж.	0,22	-34	-1,65	7,55	-24	2,38
	Жен.	0,17			10,45		

Кроме того, следует заметить, что, если облучение группы лиц произошло в возрасте g , то в дальнейшем, в достигнутом возрасте a , число новых случаев заболеваний следует рассчитывать только из той доли лиц от исходной численности группы в возрасте g , которая дожила до возраста a , оставаясь здоровой, т.е. используя вероятность здорового дожития от g до a . Эту вероятность обозначим как $S^{inc}(g, a, l, s)$ и в дальнейшем будем называть функцией здорового дожития. Здесь g – возраст при облучении, a – возраст дожития, l – локализация опухоли, s – пол. При этом в

возрасте облучения и ранее, естественно, функция здорового дожития по определению принимается равным единице, то есть $S^{inc}(g, a, l, s) = 1$, $a \leq g$.

При вычислении функции здорового дожития $S^{inc}(g, a, l, s)$ должны учитываться показатели смертности от всех причин плюс показатели заболеваемости злокачественными новообразованиями, за вычетом смертности от злокачественных новообразований (случаи смерти учитываются в заболеваемости). В этом случае приближённо $S^{inc}(g, a, l, s)$ можно определить следующим образом:

$$S^{inc}(g, a, l, s) = \prod_{i=g}^{a-1} \left(1 - \frac{\lambda_0^{totmort}(i, s) + \lambda_0^{inc}(i, l, s) - \lambda_0^{mort}(i, l, s)}{10^5} \right) \quad (1.3.8),$$

$a > g$

где $\lambda_0^{totmort}(a, s)$ – количество смертей от всех причин в возрасте от a до $a+1$ на 100 тыс. человек в год; $\lambda_0^{mort}(a, l, s)$ – количество смертей от рака локализации l в возрасте от a до $a+1$ на 100 тыс. человек в год; $\lambda_0^{inc}(a, l, s)$ – количество случаев заболевания раком локализации l в возрасте от a до $a+1$ на 100 тыс. человек в год.

Из (1.3.8) видно также, что $S^{inc}(g, a, l, s)$ также может быть найдена, используя следующую формулу:

$$S^{inc}(g, a, l, s) = \frac{S^{inc}(0, a, l, s)}{S^{inc}(0, g, l, s)}.$$

$a > g$

А $S^{inc}(0, a, l, s)$ можно вычислить, используя рекуррентную формулу:

$$S^{inc}(0, a, l, s) = S^{inc}(0, a-1, l, s) \cdot \left(1 - \frac{\lambda_0^{totmort}(a-1, s) + \lambda_0^{inc}(a-1, l, s) - \lambda_0^{mort}(a-1, l, s)}{10^5} \right) \quad (1.3.8'),$$

зная, что $S^{inc}(0, 0, l, s) = 1$.

Полный риск возникновения рака локализации l после однократного облучения с учётом (1.3.4) и функции дожития запишется в виде:

$$EAR^{inc}(g, a, l, s, D) = S^{inc}(g, a, l, s) \cdot [p(l) \cdot EAR^{mult}(g, a, l, s, D) + (1 - p(l)) \cdot EAR^{add}(g, a, l, s, D)].$$

Здесь p – весовой множитель. В МКРЗ сказано, что параметр p равен 0 для молочной железы и костного мозга, равен 1 для щитовидной железы и кожи, равен 0,3 для лёгкого и равен 0,5 для всех остальных локализаций ([ICRP Publication 103, 2007] A140).

Зная избыточный абсолютный риск, можно оценить пожизненный риск возникновения рака локализации l после однократного облучения в возрасте g дозой D . Он рассчитывается суммированием значений избыточного абсолютного риска по возрасту дожития, т.е. по следующей формуле:

$$LAR^{inc}(g, l, s, D) = \frac{1}{DDREF} \cdot \sum_{a=g}^{a_{max}} EAR^{inc}(g, a, l, s, D).$$

Здесь $DDREF$ – коэффициент эффективности дозы и мощности дозы, учитывающий уменьшение риска в случае хронического облучения или облучения в малой дозе. В МКРЗ в Публикации 103 рекомендуется значение $DDREF$ брать равное 2 ([ICRP Publication 103, 2007] A132). Обычно, a_{max} выбирается от 85 до 120 лет.

Смертность. Пожизненный риск смертности в МКРЗ-2007 получается из риска заболеваемости путём умножения последнего на так называемую долю летальности с учётом вреда от снижения качества жизни.

Из параграфов A141 и A142 МКРЗ-2007 следует, что выражение для доли летальности r выглядит так:

$$r = k + q \cdot (1 - k).$$

Здесь k – усреднённый с весом возраста в популяции коэффициент летальности; q – коэффициент, отражающий снижение качества жизни из-за серьёзного заболевания.

С учётом пола s и локализации l , выражение для доли

летальности можно записать в виде:

$$r(l, s) = k(l, s) + q(l, s) \cdot (1 - k(l, s))$$

Коэффициент летальности k можно получить путём усреднения по возрасту в популяции отношения показателя смертности к показателю заболеваемости для данного пола и локализации опухоли:

$$k(l, s) = \sum_{a=1}^{a_{\max}} \left(\frac{N(s, a)}{T(s)} \cdot \frac{\lambda_0^{\text{mort}}(a, l, s)}{\lambda_0^{\text{inc}}(a, l, s)} \right)$$

Здесь $N(s, a)$ – число людей пола s и возраста a ; $T(s)$ – общее число людей в популяции пола s .

Выражение для q в МКРЗ 2007 дано в параграфе A144, и выглядит так:

$$q(l, s) = q_{\min}(l) + k(l, s) \cdot (1 - q_{\min}(l))$$

Здесь $q_{\min}$ – минимальный весовой множитель для не смертельных раков.

В МКРЗ-2007 $q_{\min}$ берётся равной 0,1 для всех локализаций, кроме кожи ($q_{\min}=0$) и щитовидной железы ($q_{\min}=0,2$) ([ICRP Publication 103, 2007] табл. A4.5, сноска).

Итоговая формула для расчёта пожизненного риска смертности от рака выглядит так ([ICRP Publication 103, 2007] A146):

$$LAR^{\text{mort}}(g, l, s, D) = r(l, s) \cdot LAR^{\text{inc}}(g, l, s, D).$$

Модель НКДАР ООН

Эта модель, как и модель МКРЗ, построена на основе данных за период наблюдения 1958-1987 гг. когорты LSS ([UNSCEAR, 2000] 318).

В отличие от модели МКРЗ, модель НКДАР ООН даёт величину риска только в форме ERR, т.е. только в мультипликативной форме ([UNSCEAR, 2000] 321-324).

В НКДАР ООН ([UNSCEAR, 2000] 321, 323) представ-

лены две мультипликативные модели для оценки риска заболеваемости и смертности солидными раками. В первой модели риск зависит от пола и возраста при облучении, во второй – от пола и от возраста дожития. Здесь мы будем рассматривать только первую модель.

Формула, характеризующая первую модель, ([UNSCEAR, 2000] 321) и имеет вид:

$$h_D^{LSS}(a, s, g) = h_0^{LSS}(a, s, p) \cdot [1 + \beta \cdot \theta_s \cdot D \cdot \exp(\alpha \cdot g)] \quad (1.3.9).$$

Здесь h – так называемая функция опасности; s – пол; g – возраст при облучении; a – возраст дожития; D – доза облучения; p – календарный период; β , θ_s , α – параметры модели.

Функция опасности h определяется в НКДАР ООН как отношение вероятности заболеть/умереть человеку в коротком интервале времени $(a, a+1)$, к величине этого интервала $\{1\}$, при условии, что в возрасте a этот человек был здоров/жив ([UNSCEAR, 2000] 319).

Величина h_0^{LSS} соответствует функции опасности при отсутствии облучения людей радиацией. В тоже время h_D^{LSS} соответствует функции опасности при облучении людей радиацией в дозе D . Индекс LSS означает, что модель разрабатывалась на основе когорты LSS.

Для того чтобы использовать эту модель на других популяциях, НКДАР ООН предлагает два подхода: относительный и абсолютный ([UNSCEAR, 2000] 336, 337).

В первом случае функция опасности для популяции T вычисляется из избыточного относительного риска, полученного для популяции Японии J :

$$h_D^T(a, s, g) = h_0^T(a, s, p) \cdot [1 + ERR^J(D, s, a, g)] \quad (1.3.10).$$

Во втором случае функция опасности для популяции T вычисляется из избыточного абсолютного риска, полученного для популяции Японии J :

$h_D^T(a, s, g) = h_0^T(a, s, p) + EAR^J(D, s, a, g)$, где EAR^J вычисляется как:

$$EAR^J(D, s, a, g) = h_0^J(a, s, p) \cdot ERR^J(D, s, a, g).$$

В данной работе мы будем рассматривать только первый, относительный подход.

Из определения функции опасности видно, что она есть в случае смертности – показатель смертности на одного человека, а в случае заболеваемости – показатель заболеваемости на одного человека. Если не брать во внимание изменение показателей заболеваемости или смертности от календарного периода, то в общем виде можно записать:

$$h(a, l, s) = \frac{\lambda(a, l, s)}{10^5}.$$

С учётом этого перепишем формулу (1.3.9):

$$\lambda^J(g, a, l, s, D) = \lambda_0^J(a, l, s) \cdot [1 + \beta \cdot \theta_s \cdot D \cdot \exp(\alpha \cdot g)] \quad (1.3.11).$$

и формулу (1.3.10):

$$\lambda^T(g, a, l, s, D) = \lambda_0^T(a, l, s) \cdot [1 + ERR^J(g, s, D)] \quad (1.3.12).$$

Тогда из (1.3.2) и (1.3.11) следует, что:

$$ERR^J(D, s, g) = \beta \cdot \theta_s \cdot D \cdot \exp(\gamma \cdot g) \quad (1.3.13),$$

а из (1.3.2) и (1.3.12) следует, что:

$$ERR^T(g, s, D) = ERR^J(g, s, D) \quad (1.3.14).$$

В НКДАР ООН произведение $\beta \theta_s$ даётся в форме ERR на Гр в возрасте при облучении 30 лет ([UNSCEAR, 2000] 324). Учитывая это, а также то, что величины β и α зависят от локализации опухоли, получим исходя из (1.3.3), (1.3.13) и (1.3.14), выражение для абсолютного избыточного риска соответствующего модели возраста при облучении НКДАР ООН, применительно к любой популяции:

$$EAR(g, a, l, s, D) = \frac{\lambda_0(l, s, a)}{10^5} \cdot D \cdot \beta(l, s) \cdot \exp[\alpha(l) \cdot (g - 30)] \quad (1.3.15).$$

В формуле (1.3.15): l – локализация опухоли; s – пол; g – возраст при облучении; a – возраст дожития; D – доза облучения; β , α – параметры модели. Также параметр β равен соответствующему произведению $\beta \theta_s$ в формуле (1.3.13) и зависит от пола и локализации опухоли.

В НКДАР ООН параметр α непосредственно не приводится. Однако, там приведена величина, которые мы обозна-

чим как γ . Этот параметр даётся в виде процента изменения ERR при увеличении возраста при облучении на десятилетие ([UNSCEAR, 2000] 324). Исходя из этого и вида формулы (1.3.15), параметр α можно вычислить по следующей формуле:

$$\alpha(l) = \frac{1}{10} \cdot \ln \left(1 + \frac{\gamma(l)}{100} \right) \quad (1.3.16).$$

Аналогично модели МКРЗ, в расчёте избыточного риска по модели НКДАР ООН для группы лиц, облучённых в возрасте g , в достигнутом возрасте a , также необходимо учитывать только ту долю лиц от исходной численности группы в возрасте g , которая в случае риска смертности дожила до возраста a , а в случае риска заболеваемости – дожила до возраста a , оставаясь здоровой. То есть использовать функцию дожития и функцию здорового дожития соответственно от g до a .

Функция здорового дожития ничем не отличается от аналогичной функции в модели МКРЗ и рассчитывается по формуле (1.3.8) или (1.3.8').

Очевидно, что функция дожития отличается от функции здорового дожития (1.3.8) только тем, что для её вычисления используются только половозрастные показатели общей смертности в популяции и не учитывается заболеваемость раками отдельных локализаций. Рекуррентная формула, аналогичная той, что применялась для расчёта функции здорового дожития (1.3.8'), выглядит следующим образом:

$$S^{mort}(0,0,s) = 1$$

$$S^{mort}(0,a,s) = S^{mort}(0,a-1,s) \cdot \left(1 - \frac{\lambda_0^{totmort}(a-1,s)}{10^5} \right).$$

И далее:

$$S^{mort}(g,a,l,s) = \frac{S^{mort}(0,a,l,s)}{S^{mort}(0,g,l,s)} \quad (1.3.17).$$

$$a > g$$

Окончательная формула для расчёта величины избыточного абсолютного риска заболеваемости солидными ра-

ками, с учётом функции здорового дожития выглядит так:

$$EAR^{inc}(g, a, l, s, D) = \\ = S^{inc}(g, a, l, s) \cdot \frac{\lambda_0^{inc}(l, s, a)}{10^5} \cdot D \cdot \beta^{inc}(l, s) \cdot \exp[\alpha^{inc}(l) \cdot (g - 30)].$$

Аналогичная формула для расчёта избыточного абсолютного риска смертности от солидных раков выглядит так:

$$EAR^{mort}(g, a, l, s, D) = S^{mort}(g, a, s) \cdot \frac{\lambda_0^{mort}(l, s, a)}{10^5} \cdot D \cdot \beta^{mort}(l, s) \cdot \\ \cdot \exp[\alpha^{mort}(l) \cdot (g - 30)].$$

Здесь α^{inc} , β^{inc} и α^{mort} , β^{mort} – параметры модели для заболеваемости и для смертности соответственно; $S^{inc}(g, a, l, s)$ – функция здорового дожития, вычисляемая по формуле (1.3.8'), $S^{mort}(g, a, l, s)$ – функция дожития, вычисляемая по формуле (1.3.17). Параметры α^{inc} , α^{mort} вычисляются по формуле (1.3.16).

Параметры β^{inc} , γ^{inc} и β^{mort} , γ^{mort} можно найти в отчёте НКДАР ООН в табл. 31, также они представлены ниже в табл. 1.3.2.

Латентный период для солидных раков в модели НКДАР ООН T_{LS} , также как и в МКРЗ 2007, равен 10-ти годам [UNSCEAR, 2000].

Аналогично модели МКРЗ-2007, зная избыточный абсолютный риск, можно оценить пожизненный риск заболеваемости или смертности от рака локализации l после однократного облучения в возрасте g дозой D . Для сравнения с моделью МКРЗ будем также использовать коэффициент $DDREF$ и принимать его равным 2.

$$LAR^{inc}(g, l, s, D) = \frac{1}{DDREF} \cdot \sum_{a=g}^{a_{\max}} EAR^{inc}(g, a, l, s, D)$$

$$LAR^{mort}(g, l, s, D) = \frac{1}{DDREF} \cdot \sum_{a=g}^{a_{\max}} EAR^{mort}(g, a, l, s, D)$$

Таблица 1.3.2.
Параметры модели НКДАР ООН

Локализация опухоли	Пол	β^{inc}	γ^{inc}	β^{mort}	γ^{mort}
Все солидные	Муж.	0,38	-33	0,38	-32
	Жен.	0,79		0,77	
Пищевод	Муж.	0,41	0	0,91	-32
	Жен.	0,84		1,88	
Желудок	Муж.	0,29	0	0,26	-32
	Жен.	0,60		0,54	
Толстая кишка	Муж.	0,46	0	0,46	-32
	Жен.	0,95		0,95	
Печень	Муж.	0,58	-7	0,61	-13
	Жен.	0,58		0,61	
Лёгкое	Муж.	0,50	7	0,30	26
	Жен.	2,18		0,99	
Молочная железа	Жен.	1,55	0	1,34	-32
Мочевой пузырь	Муж.	1,18	-61	0,46	33
	Жен.	0,98		0,94	
Щитовидная железа	Муж.	0,89	0	—	—
	Жен.	1,84		—	
Остальные солидные	Муж.	0,47	-50	0,38	-32
	Жен.	0,28		0,77	

Сравнение модели МКРЗ-2007 и НКДАР ООН

Для сравнения моделей МКРЗ-2007 и НКДАР ООН для этих моделей были рассчитаны пожизненные риски заболеваемости и смертности раком при различных возрастах при облучении. Пожизненный риск рассчитывался, исходя из условия однократного облучения в дозе 1 Гр, а максимальный возраст a_{max} брался равным 90 лет. Затем полученные риски усреднялись по полу. В качестве показателей заболеваемости и смертности брались невзвешенные средние меж-

ду соответствующими показателями европейско-американской и азиатской популяциями. Показатели заболеваемости и смертности для этих популяций можно найти в МКРЗ-2007 ([ICRP Publication 103, 2007] табл. A4.10-A4.17).

Результаты расчёта в виде графиков можно увидеть на рис. 1.3.1, 1.3.2.

Из проделанного расчёта следует, что модели МКРЗ 2007 и НКДАР ООН различаются между собой как для смертности, так и для заболеваемости раком. Причём эти различия зависят также и от локализации раковой опухоли. Рассмотрим эти различия подробнее для каждой раковой локализации.

Заболеваемость

Все солидные. Модель НКДАР ООН в ранних возрастах при облучении оценивает риск заболеваемости солидными раками выше, чем модель МКРЗ. С ростом возраста при облучении эта разница уменьшается. Так, если в возрасте при облучении 0 лет оценки по модели НКДАР ООН превосходят оценки по модели МКРЗ в 1,82 раза (абсолютная разница $1355,9 \cdot 10^{-4}$), то примерно в возрасте при облучении 46 лет оценки риска по обеим моделям сравниваются. При дальнейшем увеличении возраста при облучении абсолютная разница рисков между оценками не превышает $22,9 \cdot 10^{-4}$.

Пищевод. Для пищевода модель НКДАР ООН даёт в целом более высокую оценку. С 19 до 46 лет модель НКДАР ООН оценивает пожизненный риск примерно в 1,5 раза большим, чем модель МКРЗ. А начиная с 64 лет, риск по модели МКРЗ становится больше. И в 76 лет он превышает риск по модели НКДАР ООН в 2 раза. Модель НКДАР ООН имеет участок, где риск примерно постоянный, равный $22,7 \cdot 10^{-4}$ (от 0 до 43 лет), после возраста при облучении 43 года риск начинает уменьшаться. Аналогичный участок имеется и для модели МКРЗ – здесь риск примерно равен $14,5 \cdot 10^{-4}$ (примерно с 29 до 52 лет).

Желудок. В отличие от риска заболеваемости раком пищевода, риск рака желудка по модели МКРЗ в период от 0

до 35 лет возраста при облучении превосходит риск по модели НКДАР ООН. В этот период оценка риска по модели НКДАР ООН остаётся примерно постоянной на уровне $75 \cdot 10^{-4}$, в то время как риск по модели МКРЗ примерно линейно уменьшается с $198 \cdot 10^{-4}$ в 0 лет. После возраста при облучении 35 лет риск по модели МКРЗ становится ниже риска по модели НКДАР ООН и к 56 годам ниже уже в 2 раза. После 35 лет наибольшая абсолютная разница в рисках по этим двум моделям достигается в возрасте при облучении 57 лет и равна $28,1 \cdot 10^{-4}$.

Толстый кишечник. Для толстого кишечника характер поведения моделей аналогичен тому, как это было для желудка. Как и для желудка, модель МКРЗ для толстого кишечника даёт риск, практически линейно убывающий с возрастом при облучении, начиная с $156,7 \cdot 10^{-4}$ в 0 лет, а риск по модели НКДАР ООН от 0 до 30 лет остаётся примерно постоянным на уровне $120,7 \cdot 10^{-4}$. Однако в случае с толстым кишечником риск по модели МКРЗ выше риска по модели НКДАР ООН в возрасте от 0 до 11 лет, а потом риск по модели МКРЗ становится ниже риска по модели НКДАР ООН и в 39 лет ниже уже в 2 раза. Максимальная абсолютная разница рисков достигается в возрасте 50 лет и равна $68 \cdot 10^{-4}$.

Печень. Для печени у характера риска по модели НКДАР ООН уже отсутствует ярко выраженная постоянная часть. Но, как и в предыдущем случае, риск по модели НКДАР ООН выше риска по модели МКРЗ начиная с возраста при облучении 7 лет. В 41 год риск по НКДАР ООН уже выше в 2 раза, а к 85 годам – в 4 раза. Как и в предыдущем случае, абсолютная разница рисков имеет максимум в возрасте при облучении 45 лет и равна $23,2 \cdot 10^{-4}$.

Лёгкие. Характер поведения рисков по моделям МКРЗ и НКДАР ООН примерно одинаков, однако почти на всём интервале возрастов при облучении риск по модели НКДАР ООН выше риска по модели МКРЗ примерно в 2-2,25 раза. Риск по обеим моделям имеет максимум. Наиболее выражен он для риска по модели НКДАР ООН. Здесь максимум дос-

тигается в возрасте при облучении 43 года и равен $299,7 \cdot 10^{-4}$. Для модели МКРЗ максимум достигается в возрасте при облучении 40 лет и равен $136,4 \cdot 10^{-4}$. Максимум абсолютной разницы между рисками приходится на возраст 45 лет и равен $164,3 \cdot 10^{-4}$.

Мочевой пузырь. Риск заболеваемости раком мочевого пузыря сильно различается при облучении в ранние годы. В возрасте при облучении 0 лет риск по НКДАР ООН больше риска по МКРЗ в 18,7 раза, в 10 лет – в 8,6 раза, в 20 лет – примерно в 4 раза, и к 37 годам риски сравниваются. Далее начинает преобладать риск по МКРЗ, и к 47 годам он становится выше, чем по НКДАР ООН в 2 раза. Также абсолютная разница рисков очень быстро уменьшается с возрастом при облучении. В возрасте при облучении 0 лет абсолютная разница рисков равна $1479,2 \cdot 10^{-4}$, в 10 лет – $543,2 \cdot 10^{-4}$, в 20 лет – $179,5 \cdot 10^{-4}$, 50 лет – $19,8 \cdot 10^{-4}$.

Смертность

Все солидные. По солидным ракам характер поведения обеих моделей аналогичен характеру поведения моделей при заболеваемости солидными раками. Как и в том случае, модель НКДАР ООН в целом оценивает риск выше, чем модель МКРЗ, и с ростом возраста при облучении разница между оценками по этим двум моделям уменьшается. Так, в возрасте при облучении 0 лет риск смертности от солидных раков по модели НКДАР ООН выше аналогичного риска по модели МКРЗ в 1,88 раза (абсолютная разница $703,7 \cdot 10^{-4}$). Сравниваются оценки рисков по обеим моделям только в возрасте при облучении 77 лет. Однако уже в возрасте 50 лет абсолютная разница между рисками становится меньше $30 \cdot 10^{-4}$.

Пищевод. Характер поведения риска смертности от рака пищевода в зависимости от возраста различен у моделей МКРЗ и НКДАР ООН. Риск по модели МКРЗ медленно уменьшается от возраста при облучении 0 лет (риск равен $17,6 \cdot 10^{-4}$) до возраста при облучении 35 лет (риск равен $13,6 \cdot 10^{-4}$), а с 35 лет и до 58 лет остаётся примерно постоянный. Далее риск медленно спадает, и в возрасте при облуче-

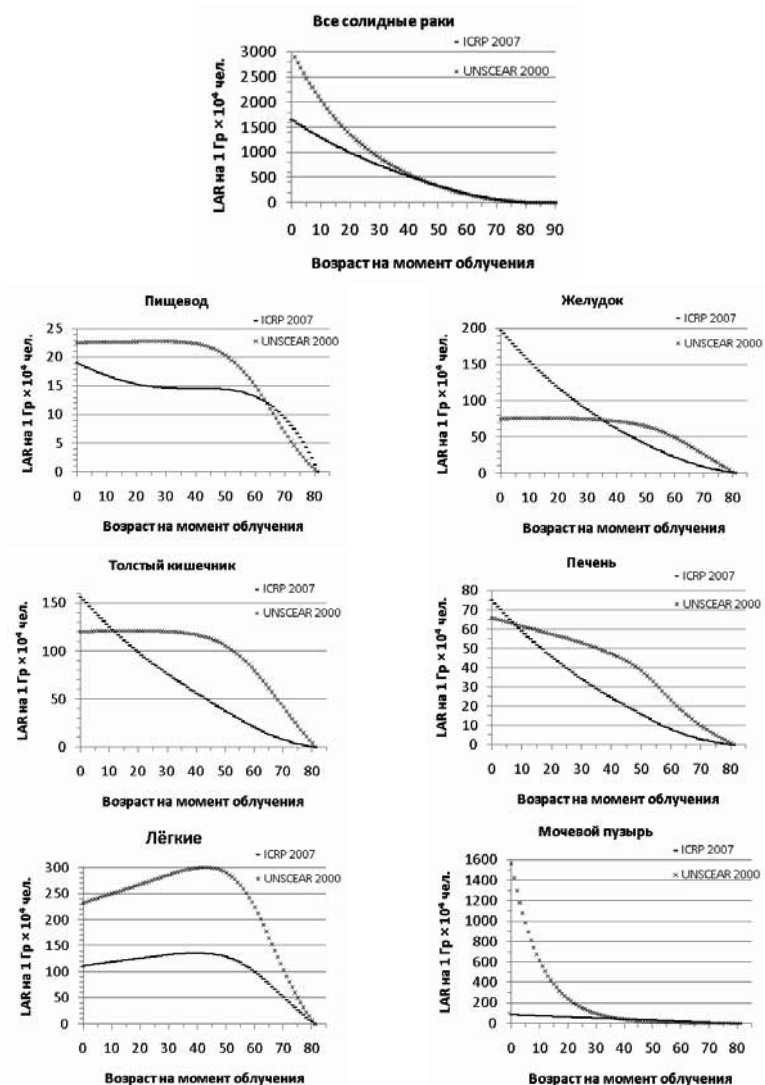


Рис. 1.3.1. Графики зависимости пожизненного риска заболеваемости раком от возраста на момент однократного облучения дозой 1 Гр. Риск рассчитан на 10^4 человек для шести локализаций опухоли: пищевод, желудок, толстый кишечник, печень, лёгкие, мочевой пузырь. Во всех случаях пожизненный риск усреднён по полу. На каждом графике показаны риски, полученные по двум разным моделям: МКРЗ 2007 (—) и НКДАР ООН (×)

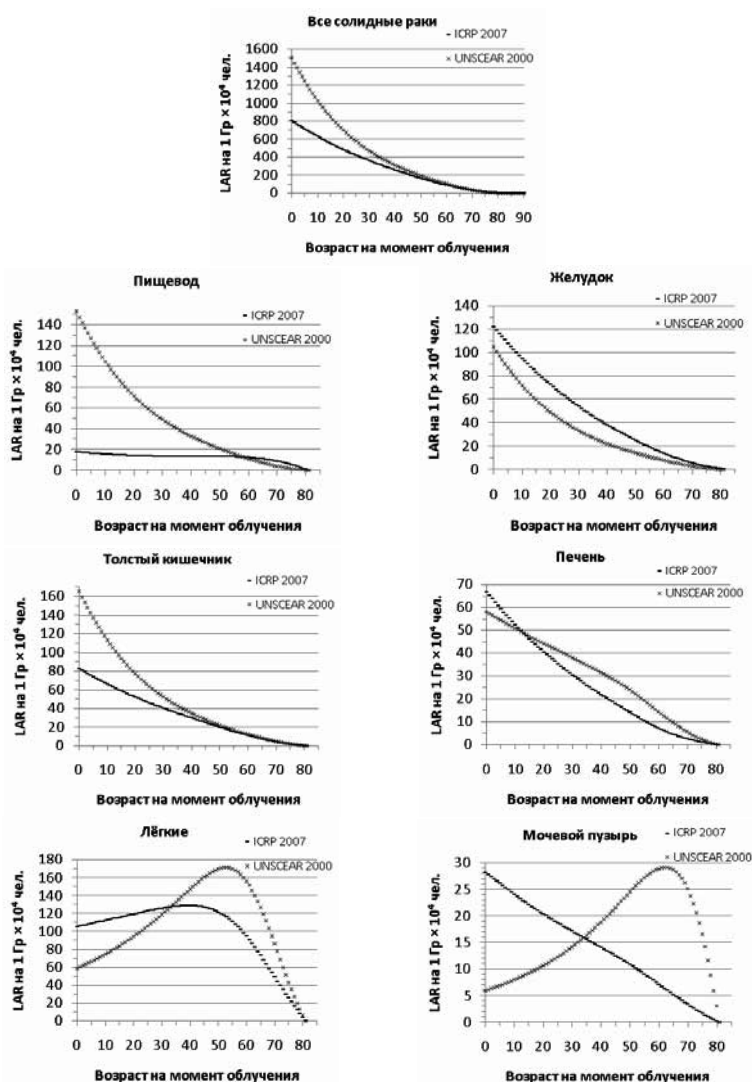


Рис. 1.3.2. Графики зависимости пожизненного риска смертности раком от возраста на момент однократного облучения дозой 1 Гр. Риск рассчитан на 10^4 человек для шести локализаций опухоли: пищевод, желудок, толстый кишечник, печень, лёгкие, мочевой пузырь. Во всех случаях пожизненный риск усреднён по полу. На каждом графике показаны риски, полученные по двум разным моделям: МКРЗ 2007 (—) и НКДАР ООН (×)

нии 70 лет он ещё равен $11,6 \cdot 10^{-4}$. В то же время риск по модели НКДАР ООН имеет другой вид. Здесь нет постоянных участков. Начиная с возраста при облучении 0 лет (риск равен $152,4 \cdot 10^{-4}$), риск по НКДАР ООН начинает быстро уменьшаться, но сравнивается с риском по МКРЗ лишь в возрасте при облучении 58 лет. Далее риск по НКДАР ООН становится ниже риска по МКРЗ и в 68 лет ниже уже в 2 раза. В возрасте при облучении 0 лет риск по модели НКДАР ООН выше риска по модели МКРЗ в 8,7 раза, в 20 лет – в 5 раз.

Желудок. Для желудка риск смертности по модели МКРЗ превосходит риск по НКДАР ООН для всех возрастов при облучении примерно в 1,2-2 раза. Вид зависимости риска от возраста при облучении для обеих моделей примерно одинаков. Максимальная абсолютная разница между рисками достигается в возрасте 16 лет и равна $24,3 \cdot 10^{-4}$.

Толстый кишечник. Для толстого кишечника модель НКДАР ООН даёт оценки выше, чем модель МКРЗ для всех возрастов при облучении. Но эта разница заметна лишь в ранних годах при облучении (разница в 2 раза в возрасте при облучении 0 лет), а начиная с 37 лет оценки по модели НКДАР ООН выше оценок по модели МКРЗ всего в 1,2 раза. При этом абсолютная разница рисков между моделями также уменьшается с возрастом при облучении. Так, в возрасте 0 лет абсолютная разница рисков по двум моделям равна $82,4 \cdot 10^{-4}$, а в возрасте при облучении 60 лет – уже $1,5 \cdot 10^{-4}$.

Печень. Для печени риски смертности по модели МКРЗ больше рисков смертности по модели НКДАР ООН лишь в период возрастов при облучении от 0 до 13 лет, а далее риски по модели НКДАР ООН начинают преобладать над рисками по МКРЗ. К 60 годам риски по НКДАР ООН уже в 2 раза выше рисков по МКРЗ. В возрасте при облучении 72 года выявляется наибольшая относительная разница между рисками (риск по НКДАР ООН больше риска по МКРЗ в 2,2 раза). В то же время в возрасте при облучении 47 лет выявляется наибольшая абсолютная разница рисков (риск по НКДАР ООН больше риска по МКРЗ на $10,1 \cdot 10^{-4}$).

Лёгкие. Для лёгких риск смертности по модели МКРЗ выше, чем по модели НКДАР ООН до возраста при облучении 33 года. В возрасте при облучении 0 лет риск по МКРЗ превосходит риск по НКДАР ООН в 1,8 раза. После 33 лет риск по модели НКДАР ООН превышает риск по модели МКРЗ. Наибольшая относительная разница достигается в возрасте при облучении 69 лет (в 1,75 раза), а наибольшая абсолютная разница достигается в возрасте при облучении 59 лет ($61,3 \cdot 10^{-4}$). Риски как по модели МКРЗ, так и по НКДАР ООН имеют максимум. Для МКРЗ это 39 лет, а для НКДАР ООН – 53 года при облучении.

Мочевой пузырь. Характер зависимости риска смертности для мочевого пузыря от возраста при облучении различен для моделей МКРЗ и НКДАР ООН. В МКРЗ происходит примерно линейный спад риска с увеличением возраста при облучении, в то время как в НКДАР ООН, наоборот, происходит практически линейный рост риска с увеличением возраста при облучении до 62 лет, а затем резкий спад величины риска. Точкой, в которой риски сравниваются, является возраст при облучении 34 года. В возрасте при облучении 0 лет риск по модели МКРЗ превосходит риск по модели НКДАР ООН в 4,75 раза. В точке максимума риска по модели НКДАР ООН (62 года) риск по модели НКДАР ООН превосходит риск по модели МКРЗ в 4,56 раза, а абсолютная разница рисков равна $22,8 \cdot 10^{-4}$. После 62 лет относительная разница рисков по двум моделям продолжает расти, а абсолютная разница достигает максимума ($23,5 \cdot 10^{-4}$) в возрасте при облучении 65 лет, а затем начинает уменьшаться.

Сравнение модели МКРЗ 2007 и НКДАР ООН 2006

В отличие от модели МКРЗ 2007 г., модель НКДАР 2006 г. [UNSCEAR, 2008] не даёт отдельного выражения для радиационного риска всех солидных злокачественных новообразований (ЗНО) в совокупности. Модели НКДАР-2006 по локали-

зациям представлены в табл. 1.3.3. Латентный период T_{LS} в моделях НКДАР-2006 для солидных ЗНО равен 5-ти годам, а для лейкемии – 2 года. В целях сравнения двух моделей в дальнейших расчётах по обеим моделям латентный период солидных ЗНО был принят равным 10 годам, а лейкемии – 2 года. Результаты сравнения моделей для российской популяции при однократном облучении приведены на рис. 1.3.3.

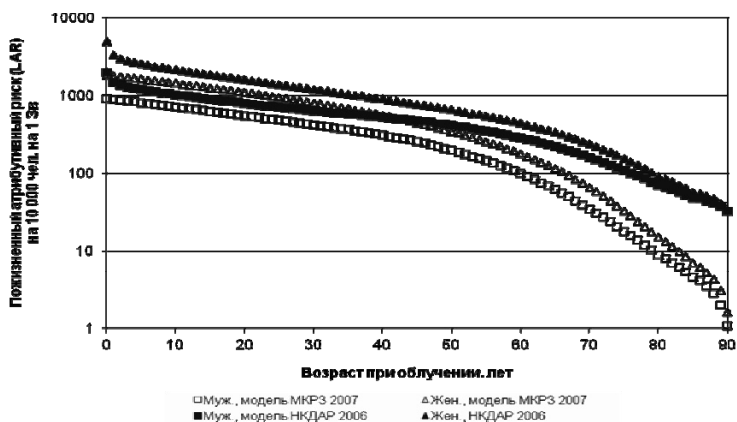


Рис. 1.3.3. Пожизненный атрибутивный риск (LAR) заболеваемости солидными ЗНО, на 10000 человек, от однократного облучения эквивалентной дозой 1 Зв, в зависимости от возраста при облучении, по моделям МКРЗ-2007 [ICRP Publication 103, 2007] и НКДАР-2006 [UNSCEAR, 2008]; использовались российские показатели заболеваемости и смертности за 2012 г. [Каприн А.Д. и др., 2014]

Как и в случае модели МКРЗ-2007, при пролонгированном облучении полный избыточный абсолютный риск EAR в возрасте a будет складываться из рисков в этом возрасте, обусловленных однократными облучениями в каждом году. Запишем отдельно риск, полученный по мультипликативной и аддитивной моделям:

$$EAR^{mult}(e, a, l, s) = \sum_{g=0}^e EARS^{mult}(g, a, l, s, D_g), \quad a > e \quad (1.3.18),$$

$$EAR^{add}(e, a, l, s) = \sum_{g=0}^e EARS^{add}(g, a, l, s, D_g), \quad a > e \quad (1.3.19).$$

Таблица 1.3.3.
*Модели НКДАР-2006 радиационных рисков заболеваемости для различных локализаций
 солидных ЗНО*

Локализация ЗНО	Модель абсолютного избыточного риска EAR^{add}	Модель относительного избыточного риска ERR^{mult}
Все солидные	–	–
Пищевод	$1,45293 \cdot 10^{-5} \cdot D$	$0,52782 \cdot D$
Желудок	$3,96925 \cdot 10^{-7} \cdot D \cdot \exp(1,828 \cdot \ln(a))$	$4,02503 \cdot 10^3 \cdot D \cdot \exp(-2,253 \cdot \ln(a))$
Толстый кишечник	$2,87527 \cdot 10^{-9} \cdot D \cdot \exp(3,204 \cdot \ln(a - g))$	$1,48080 \cdot 10^6 \cdot D \cdot \exp(-3,526 \cdot \ln(a))$
Печень	$1,03736 \cdot 10^{-10} \cdot D \cdot \exp(3,479 \cdot \ln(a))$	$3,95106 \cdot 10^{-1} \cdot D$
Лёгкие	$1,00830 \cdot 10^{-11} \cdot D \cdot \exp(0,4008 \cdot s + 4,211 \cdot \ln(a))$	$3,18224 \cdot 10^{-1} \cdot D \cdot \exp(1,4808 \cdot s)$
Молочная железа	$s \cdot 1,94038 \cdot 10^{-5} \cdot D \cdot \exp(1,086 \cdot \ln(a - g))$	$s \cdot 1,49221 \cdot 10^4 \cdot D \cdot \exp(-2,304 \cdot \ln(a))$
Мочевой пузырь	$6,13572 \cdot 10^{-15} \cdot D \cdot \exp(5,748 \cdot \ln(a))$	$8,98885 \cdot 10^{-1} \cdot D$
Щитовидная железа	$2,62870 \cdot 10^{-4} \cdot D \cdot \exp(1,3624 \cdot s - 0,3883 \cdot \ln(g));$ $g > 0$	$3,80452 \cdot 10^4 \cdot D \cdot \exp(-0,4405 \cdot \ln(g) - 2,197 \cdot \ln(a));$ $g > 0$

Ещё одно отличие от модели МКРЗ-2007 заключается в том, что в модели НКДАР-2006 функция здорового дожития зависит от дозы облучения, т.к. учитывает выбытие из-под наблюдения также и вследствие радиационно-индуцированных ЗНО:

при $a \leq e$

$$S^{mult}(e, a, l, s, D) = S^{add}(e, a, l, s, D) = 1 \quad (1.3.20),$$

при $a > e$

$$\begin{aligned} S^{mult}(e, a, l, s, D) = \\ = \exp \left(- \sum_{k=e}^{a-1} \left[10^{-5} \cdot \left[\lambda_0^{totmort}(k, s) + \lambda_0^{inc}(k, l, s) - \lambda_0^{mort}(k, l, s) \right] + EAR^{mult}(e, k, l, s) \right] \right) \\ S^{add}(e, a, l, s, D) = \\ = \exp \left(- \sum_{k=e}^{a-1} \left[10^{-5} \cdot \left[\lambda_0^{totmort}(k, s) + \lambda_0^{inc}(k, l, s) - \lambda_0^{mort}(k, l, s) \right] + EAR^{add}(e, k, l, s) \right] \right) \end{aligned} \quad (1.3.21).$$

Таким образом, с учётом функции здорового дожития окончательная формула для расчёта избыточного абсолютного риска заболеваемости солидными ЗНО вследствие пролонгированного облучения по модели НКДАР 2006 г. запишется в виде:

$$\begin{aligned} EAR(e, a, l, s) = p(l) \cdot S^{mult}(e, a, l, s) \cdot EAR^{mult}(e, a, l, s) + \\ + (1 - p(l)) \cdot S^{add}(e, a, l, s) \cdot EAR^{add}(e, a, l, s) \end{aligned} \quad (1.3.22).$$

Здесь p – весовые множители. В целях сравнения можно использовать их равными аналогичным множителям в модели МКРЗ-2007.

В этой формуле также $l > 0$, т.к. НКДАР-2006 не даёт моделей рисков заболеваемости всеми солидными ЗНО в совокупности. Поэтому избыточный абсолютный риск по всем солидным ЗНО получим суммированием рисков по отдельным локализациям, т.е.:

$$EAR(e, a, 0, s) = \sum_{l=1}^8 EAR(e, a, l, s) \quad (1.3.23).$$

Зная избыточный абсолютный риск, можно оценить пожизненный риск возникновения ЗНО локализации l после пролонгированного облучения до возраста e , как по модели

НКДАР-2006, так и по модели МКРЗ-2007. Он рассчитывается суммированием значений избыточного абсолютного риска по возрасту дожития, т.е. по следующей формуле:

$$LAR(e, l, s) = \sum_{a=e}^{a_{\max}} EAR(e, a, l, s) \quad (1.3.24).$$

Для российских популяций $a_{\max}$ принимается равным 100 лет.

Результаты сравнения моделей МКРЗ-2007 и НКДАР-2006 для жителей районов Брянской области России, загрязнённых в результате аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г., приведены на рис. 1.3.4 (для солидных ЗНО) и на рис. 1.3.5 (для лейкозов). Загрязненными районами Брянской области считаются следующие семь районов: Новозыбковский, Злынковский, Красногорский, Клинецовский, Гордеевский, Климовский, Стародубский. Средние накопленные эквивалентные дозы на всё тело для населения, проживающего в этих районах с 1986 г., от облучения за счёт радиоизотопов цезия, составили от 0,008 Зв (Стародубский район) до 0,096 Зв (Гордеевский район), со средним значением 0,037 Зв.

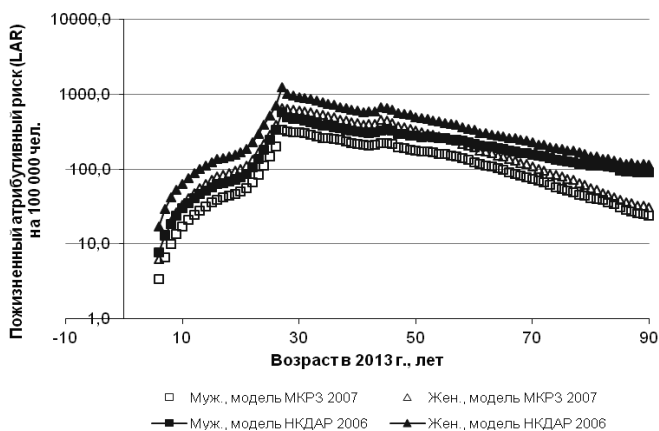


Рис. 1.3.4. Пожизненный атрибутивный риск (LAR) заболеваемости солидными ЗНО, на 100000 человек, для жителей загрязнённых районов Брянской области, в зависимости от возраста в 2013 г., по моделям МКРЗ-2007 [ICRP Publication 103, 2007] и НКДАР-2006 [UNSCEAR, 2008]; использовались российские показатели заболеваемости и смертности за 2012 г. [Каприн А.Д. и др., 2014]

На примере загрязнённых районов Брянской области видно, что максимум пожизненного атрибутивного риска для солидных ЗНО (рис. 1.3.4) приходится на возраст в 2013 г. 27 лет, т.е. на 1986 год рождения: на этот возраст приходится самая большая накопленная доза. Пожизненный атрибутивный риск лейкозов (рис. 1.3.5) не имеет такой особенности, так как годовой риск лейкозов (EAR) быстро убывает со временем после облучения, что соответствует фактически ситуации однократного облучения, а не пролонгированного.

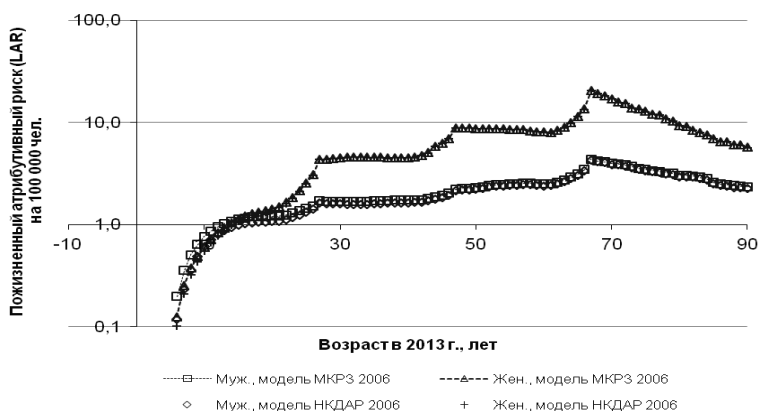


Рис. 1.3.5. Пожизненный атрибутивный риск (LAR) заболеваемости лейкозами, на 100000 человек, для жителей загрязнённых районов Брянской области, в зависимости от возраста в 2013 г., по моделям МКРЗ-2007 [ICRP Publication 103, 2007] и НКДАР-2006 [UNSCEAR, 2008]; использовались Российские показатели заболеваемости и смертности за 2012 г. [Каприн А.Д. и др., 2014]

Как видно из проведённых вычислений, радиационный риск солидных ЗНО, вычисленный по модели НКДАР-2006, превышает аналогичный риск, полученный по модели МКРЗ-2007. В среднем по всем солидным ЗНО оценка риска по модели НКДАР-2006 превышает оценку риска по модели МКРЗ-2007 в 2 раза. В основном, это связано с тем, что для

солидных ЗНО модели МКРЗ-2007 используют фактор $DDREF=2$, в то время как модели НКДАР-2006 этот фактор не используют. Модели радиационного риска лейкозов совпадают. Полученные данные представляют большой интерес при решении практических задач оптимизации радиационной защиты [Иванов В.К. и др., 2006а; Иванов В.К. и др., 2006б; Иванов В.К. и др., 2008].

1.4. Формирование групп потенциального онкологического риска при профессиональном облучении на основе технологий молекулярной и радиационной эпидемиологии

Министерство здравоохранения РФ 1 ноября 2003 г. ввело в действие Руководство по оценке профессионального риска для здоровья работников (Р 2.2.1766-03), разработанное Государственным учреждением «Научно-исследовательский институт медицины труда РАМН» (руководитель разработки – академик РАМН Н.Ф. Измеров) [Гигиена труда, 2003].

Для оценки степени причинно-следственной связи нарушений здоровья и профессиональной деятельности в Руководстве используются понятия относительного риска (RR) и этиологической доли (EF). Если в эпидемиологических исследованиях через O обозначить наблюдаемое число заболеваний, а через E – ожидаемое число заболеваний, то величина относительного риска определяется по формуле: $RR = O/E$, а величина этиологической доли (атрибутивного риска) по формуле: $EF = (1 - 1/RR) \cdot 100 \%$.

Так, в частности, если величина относительного риска $RR=1,5$ (т.е. наблюдаемое число заболеваний в 1,5 раза превышает ожидаемое), то величина этиологической доли составляет 33 % (т.е. каждое третье заболевание из числа наблюдаемых в данном примере следует отнести к профессионально-обусловленным).

В Руководстве по оценке профессионального риска для здоровья работников (Р 2.2.1766-03) отмечается необходимость подготовки конкретных методических указаний, реализующих базовую технологию Руководства для отдельных факторов риска рабочей среды.

На рис. 1.4.1 показана в общем виде технология оценки онкологических рисков на основе молекулярной и радиационной эпидемиологии. Основная идея такого подхода понятна – необходимо сформировать (если это возможно) группу риска таким образом, чтобы доля лиц с высокой этиологической долей (атрибутивным риском) была максимальна. В этом случае, за счет сокращения общей численности группы риска, возможно использование дорогостоящих диагностических технологий ранней диагностики при онкопатологии, повышение продолжительности жизни выявленных онкологических больных и, следовательно, укрепление кадрового потенциала предприятий атомной промышленности.

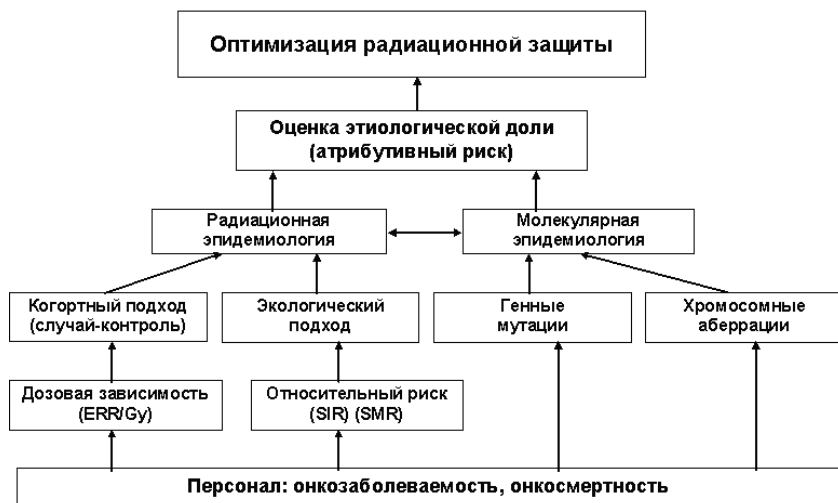


Рис. 1.4.1. Технология оценки онкологического риска на основе молекулярной и радиационной эпидемиологии

Определение генных мутаций по локусу Т-клеточного рецептора

Метод определения генных мутаций по локусу Т-клеточного рецептора был разработан в Японии в Фонде по исследованию радиационных эффектов [Kyoizumi et al., 1990] и использован нами с небольшими модификациями.

Принцип метода заключается в следующем. Т-клеточный рецептор, состоящий из нескольких белковых цепей, играет главную роль в распознавании антигена и активации зрелых Т-клеток. Он находится на поверхности зрелых Т-лимфоцитов и образует комплекс с CD3-антигеном. Мутации, которые происходят в локусе, кодирующем белки TCR, могут быть выявлены по изменению способности последнего образовывать комплекс с CD3-антигеном. В случае такой мутации на поверхности Т-клеток отсутствует TCR/CD3-комплекс. Поэтому мутантные Т-клетки (в отличие от немутантных) не связывают антитела к CD3 антигену и по этому признаку регистрируются с помощью проточной цитометрии. Как известно, кроме Т-клеток в периферической крови находятся и другие субпопуляции лимфоцитов, которые так же, как и мутантные Т-клетки, характеризуются отсутствием CD3-антигена. По этой причине одновременно с выявлением CD3-антигена необходимо очень точно выявить сами Т-клетки. Это делают с помощью антител к CD4-антигену. В итоге получают распределение лимфоцитов периферической крови по интенсивности связывания указанных антител, как показано на рис. 1.4.2. Анализируя это распределение, определяют количество мутантных $CD4^+/CD3^-$ клеток.

Подробное описание методики приведено ниже. Венозная кровь обследуемых лиц была помещена в пробирки с гепарином и транспортирована к месту анализа в течение 1 ч. С помощью центрифугирования в градиенте плотности фиколлюрографина («Панэко», РФ, плотность 1,077) из 3 мл крови выделяли моноклеарную фракцию клеток. При этом кровь, разбавленную в два раза раствором Хенкса («Панэко», РФ),

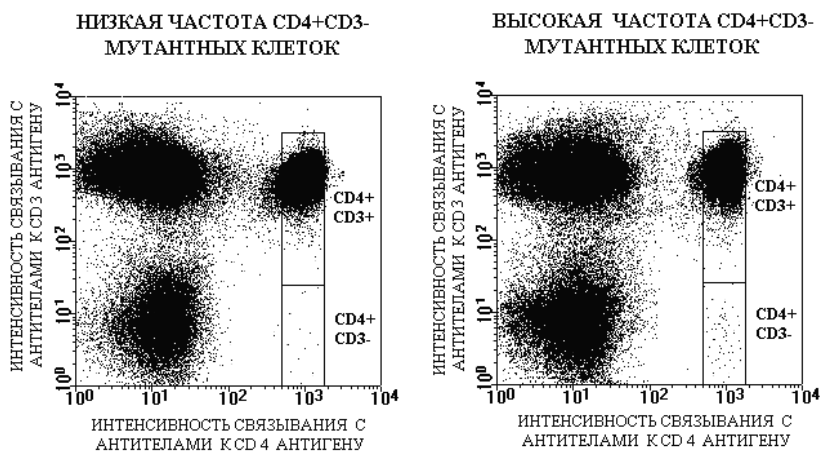


Рис. 1.4.2. Распределение лимфоцитов периферической крови по интенсивности связывания антител к CD3 и CD4-антигенам

наслаивали на 3 мл раствора фиколл-урографина и центрифугировали в течение 30 минут при 250 g. Клетки из слоя мононуклеаров собирали и отмывали по 2 раза раствором Хенкса, а затем 0,01 М фосфатным буфером, содержащем 0,15 М NaCl (ФБ, pH 7,2), с помощью центрифугирования при 350 g в течение 15 мин. Для последующего окрашивания отбирали $(1,0-1,5) \cdot 10^6$ клеток.

Окрашивание мононуклеарных клеток проводили по методике, описанной в работе [Kyoizumi et al., 1992], с некоторыми модификациями. К клеткам приливали по 10 мкл моноклональных антител: к CD4, меченных ФИТЦем, к CD3 и HLA-DR, меченных фикоэритрином (Becton Dickinson Immunocytometry Systems – BDIS, США), и инкубировали в темноте 30 минут. Затем клетки отмывали в 1,0 мл ФБ, содержащего 1,0 % бычьего сывороточного альбумина (Sigma, США) и 0,1 % NaN_3 (Sigma, США), с помощью центрифугирования (300 g, 5 мин). К осадку добавляли 0,5 мл ФБ, затем суспензию клеток фильтровали через нейлоновый фильтр (Д-45 мкм) и фиксировали в 0,5 мл 1 % раствора формальдегида в ФБ.

Образцы анализировали на проточном цитофлуориметре FACS Vantage (BDIS, США), оборудованном 488 нм лазером (Enterprise 621, Coherent Inc., США) не позднее, чем через 2 часа после окрашивания. Анализ клеток в образце проводили по четырем параметрам: интенсивности прямого и бокового светорассеяния (линейная шкала), флуоресценции ФИТЦа и фикоэритрина (логарифмическая шкала). Для измерения флуоресценции ФИТЦа использовали узкополосные фильтры 530/30 нм, фикоэритрина – 575/26 нм. Мощность лазера составляла 30 мВт.

Компьютерную обработку проводили с использованием программы LysysII (BDIS, США). На графике распределения клеток по интенсивности светорассеяния выбирали регион неповрежденных лимфоцитов и в дальнейшем оценивали флуоресценцию клеток, меченных ФИТЦем и фикоэритрином, только в этом регионе. На графике распределения клеток по интенсивности флуоресценции определяли количество клеток с иммунофенотипом CD3+CD4+, характерным для Т-хелперных лимфоцитов, и с вариантным иммунофенотипом CD3-CD4+, который соответствует клеткам с мутациями по TCR-локусу. Частоту мутантных клеток определяли как отношение числа клеток с фенотипом CD3-CD4+ к числу CD3+CD4+клеток. В каждом образце анализировали $2 \cdot 10^5$ лимфоцитов.

Основные характеристики профессионального облучения обследованных лиц

В настоящее время в ФЭИ с источниками ионизирующего излучения (ИИИ) работает около 1100 человек, 80 % из которых – мужчины. Эти люди находятся на индивидуальном дозиметрическом контроле. Электронная база данных индивидуального дозиметрического контроля содержит персонифицированную информацию о ежегодных дозовых нагрузках

персонала с момента начала работы с ИИИ. На рис. 1.4.3 приведена динамика годовых доз облучения работника, который начал работать с 1963 г. В 1980 г. он получил наибольшую дозу – 30 мЗв, а в 1990 и 1991 гг. не работал с ИИИ. За 41 год работы он получил 590 мЗв, при этом средняя за весь период работы годовая доза составила 15 мЗв/год.

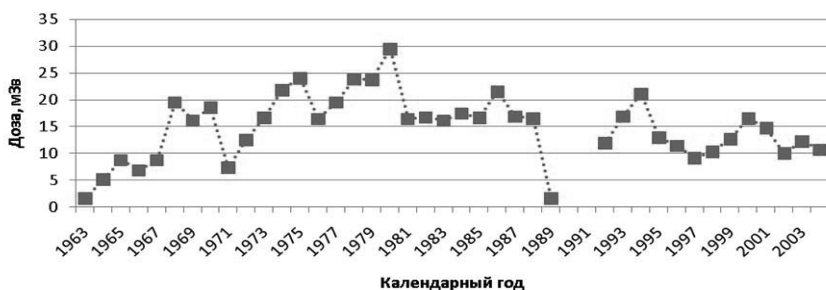


Рис. 1.4.3. Пример динамики годовых доз облучения

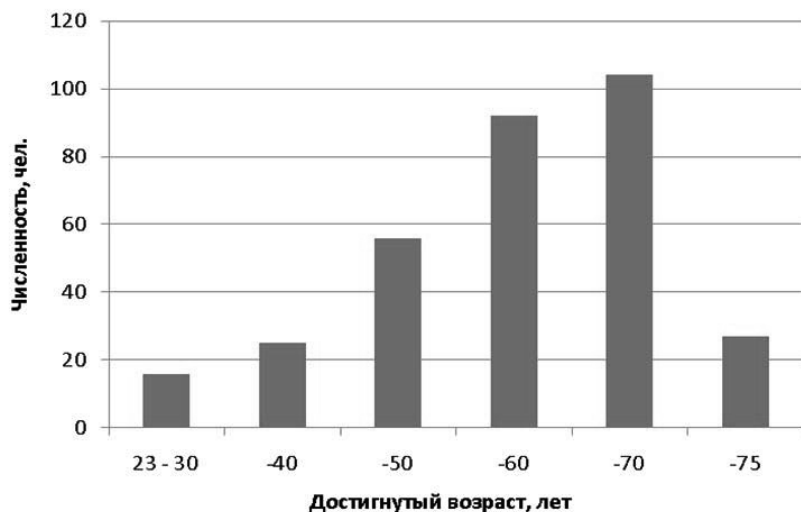


Рис. 1.4.4. Распределение обследованных лиц по возрасту, достигнутому в год взятия пробы крови

Работники, находящиеся на индивидуальном дозиметрическом контроле, каждый год проходят обязательный медицинский осмотр. В ходе проведения медицинских осмотров 2002–2006 гг. у 320 мужчин в возрасте от 23 до 75 лет были взяты пробы крови для определения генных мутаций по локусу Т-клеточного рецептора. Распределение обследованных лиц по возрасту, достигнутому в год взятия проб крови, приведено на рис. 1.4.4. Средний возраст – 56 лет, медиана и мода – 57 лет.

Наиболее распространенной характеристикой профессионального облучения является величина накопленной дозы. Средняя накопленная доза у 320 обследованных лиц составила 100 мЗв, максимальная – 590 мЗв, у 270 человек накопленная доза не превысила 200 мЗв (рис. 1.4.5).

Начиная с 1972 г. среднегодовая доза облучения для всей группы обследованных лиц колебалась в пределах 2-4 мЗв (рис. 1.4.6, по правой вертикальной оси приведена численность работников, для которых вычислялась средняя доза).

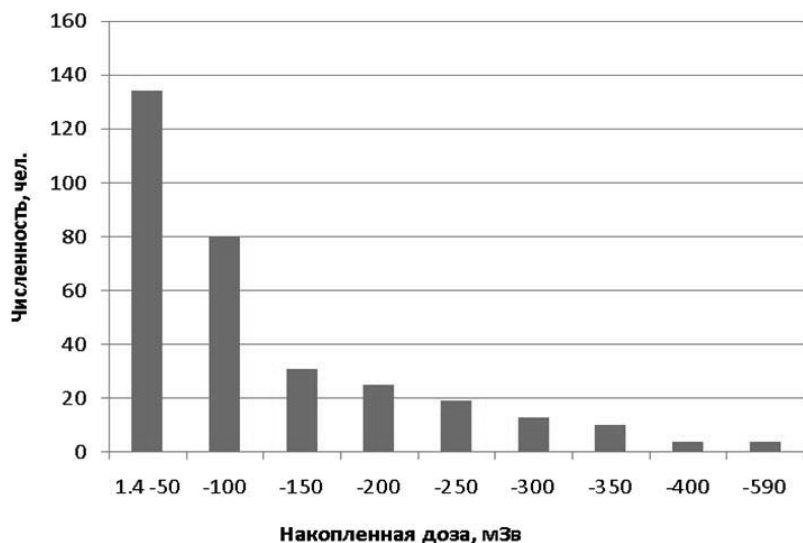


Рис. 1.4.5. Распределение обследованных лиц по накопленной дозе

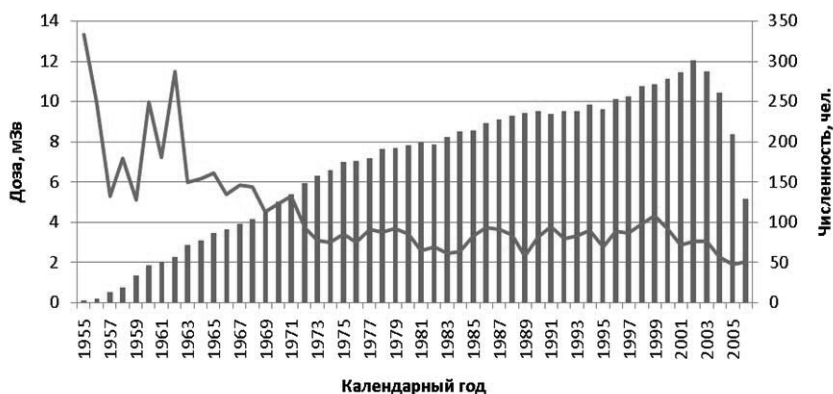


Рис. 1.4.6. Динамика среднегодовой дозы у обследованных лиц (ломаная линия) и численности работников, для которых вычислялась средняя доза (вертикальные полосы)

Несмотря на то, что в среднем за год дозы облучения небольшие, 48 работников в разное время получили годовые дозы свыше 20 мЗв, а у четверых максимальная годовая доза была более 100 мЗв (рис. 1.4.7).

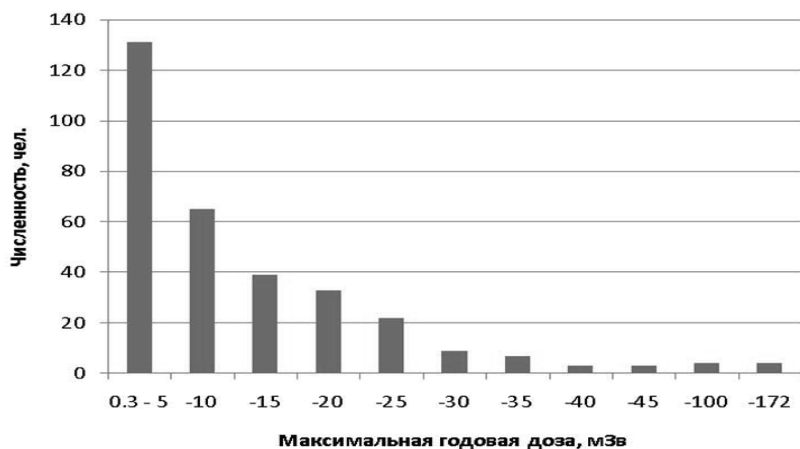


Рис. 1.4.7. Распределение обследованных лиц по максимальной годовой дозе

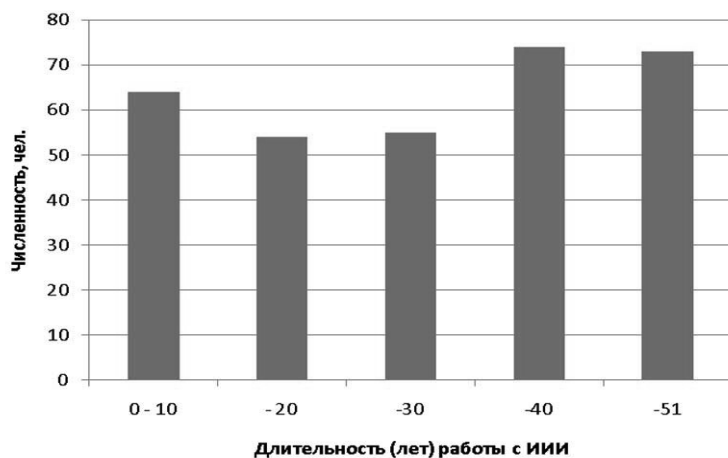


Рис. 1.4.8. Распределение обследованных лиц по длительности работы с источниками ионизирующего излучения

Распределение обследованных лиц по длительности работы с источниками ионизирующего облучения приведено на рис. 1.4.8. Средняя продолжительность работы с ИИИ – 26 лет, максимальная – 51 год, 202 человека проработали с ИИИ более 20 лет.

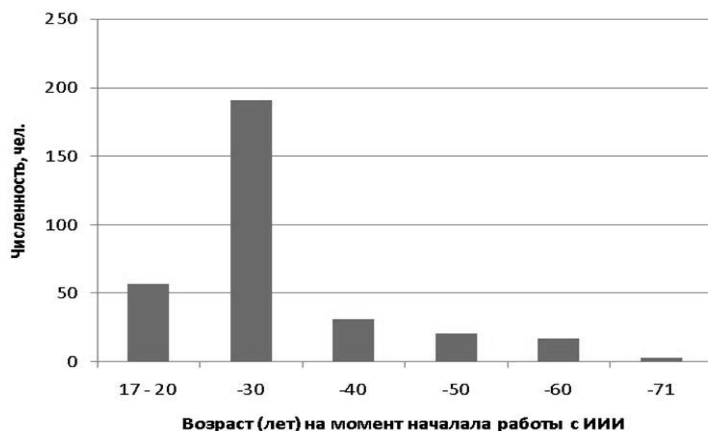


Рис. 1.4.9. Распределение обследованных лиц по возрасту на момент начала работы с источниками ионизирующего излучения

Персонал начинал работать с ИИИ преимущественно в возрасте до 30 лет – 248 человек, 20 человек были в возрасте старше 50 лет на момент начала работы (рис. 1.4.9).

Воздействие профессионального облучения на здоровье работника наиболее полно характеризуется такой интегральной мерой, как риск, ассоциированный с фактором воздействия (атрибутивный риск) [Breslow, Day, 1980]. Атрибутивный риск солидных злокачественных новообразований, выраженный в процентах, AR % (или этиологическую долю) при однократном облучении обычно вычисляют, исходя из оценки избыточного относительного риска ERR:

$$AR\% = \frac{ERR}{ERR + 1} \cdot 100\% .$$

В случае многократного облучения, которое характерно для работников атомных предприятий, используют сумму ERR. Величину ERR оценивали, основываясь на мультипликативной модели смертности от всех солидных злокачественных новообразований [UNSCEAR, 2008]. Для мужчин

$$ERR = 601,02 \cdot D \cdot \exp[0,9903 \cdot \ln[a - e] + -2,635 \cdot \ln[a]] ,$$

где D – доза облучения, Зв; a – достигнутый возраст; e – возраст на момент облучения.

Атрибутивный риск вычисляли с учетом 10-летнего латентного периода. У 5 из 320 обследованных лиц атрибутивный риск на момент взятия пробы крови был 10 % и выше. Максимальный атрибутивный риск составил 12,4 %.

Выбор локуса, кодирующего белки Т-клеточного рецептора, в целях формирования группы повышенного канцерогенного риска

В целом, уровень соматического мутагенеза можно в настоящее время оценивать по частоте клеток, несущих структурные или генные мутации. Однако механизмы формирования тех и других в известной степени различаются, и имеются

основания полагать, что оценка именно *генных* мутаций является более информативным подходом к выявлению лиц, имеющих повышенный риск возникновения злокачественных опухолей, включая, прежде всего, солидные новообразования.

Ключевыми событиями в злокачественной трансформации клеток являются изменения генетического материала соматических клеток, причем возникновение солидных опухолей связано, в первую очередь, с накоплением *генных* мутаций. Кроме того, многие специалисты, занимающиеся изучением механизмов канцерогенеза, считают, что необходимым этапом злокачественной трансформации клеток является возникновение генетической нестабильности [Loeb, 1991; Schmutte, Fishel, 1999]. В то же время многочисленные радиобиологические исследования свидетельствуют о возникновении радиационно-индуцированной нестабильности генома у части облученных клеток/организмов (в том числе и при действии ионизирующих излучений в малых дозах). При этом установлено, что генетическая нестабильность выражается в увеличении количества как *генных*, так и структурных мутаций, однако при действии редкоионизирующего излучения затрагивает в большей степени небольшие участки ДНК [Little, 1998]. Это определяет актуальность и перспективность, прежде всего, частоты *генных* мутаций (среди других показателей соматического мутагенеза) как возможного биологического критерия для оценки канцерогенного риска.

При решении вопроса, какие именно клетки необходимо исследовать с целью формирования группы повышенного канцерогенного риска, следует исходить из нескольких соображений, включая практико-экономические. Выбор клеток определяется, прежде всего, доступностью биологического материала и наличием неинвазивных или мало инвазивных способов его получения. Несомненно, что таким материалом являются клетки периферической крови. К тому же показано, что интенсивность мутационного процесса в клетках крови коррелирует с таковой в других клетках организма, включая стволовые клетки, мутации в которых, по-

видимому, и приводят к возникновению злокачественных новообразований [Grant et al., 1999; Pathak, 2002].

Выбор генных локусов также определяется как теоретическими, так и практическими соображениями. Среди последних – наличие возможности проведения массовых обследований. Конечно, наибольший интерес представляла бы информация о количестве мутаций в генах, непосредственно участвующих в злокачественной трансформации клеток – онкогенах и генах-супрессорах опухолей. Считают, что канцерогенез – сложный, многоступенчатый процесс, в котором участвуют несколько генных локусов. Причем, как стало ясно в последние годы, спектр вовлеченных в процесс канцерогенеза генов достаточно разнообразен не только в случае новообразований разных локализаций, но даже и одной локализации (хотя существует и значительное перекрывание спектров таких генов). Учитывая эти обстоятельства, следовало бы оценивать количество мутаций в нескольких генных локусах, наиболее часто вовлеченных в канцерогенез. Ясно, что анализ мутагенеза в большом количестве генных локусов увеличивал бы чувствительность такого подхода к формированию группы повышенного риска злокачественных новообразований, но и существенно повышал бы стоимость исследования. К тому же, в настоящее время не существует методов анализа соматических мутаций в онкогенах и генах-супрессорах опухолей, которые были бы пригодны для проведения массовых обследований.

Возможен и другой подход к выбору генных локусов, основанный на представлениях о том, что количество мутаций в любом локусе, в основном, отражает общий уровень мутагенеза в соматических клетках. В таком случае критерием повышенного канцерогенного риска может быть высокая частота клеток с мутациями практически в любом локусе, даже не связанном непосредственно с канцерогенезом. Для локуса, кодирующего белки Т-клеточного рецептора, показано, что: 1) количество таких клеток увеличивается при действии генотоксических факторов (включая ионизирующие излучения) на орга-

низм человека; 2) у лиц с наследственной предрасположенностью к возникновению злокачественных новообразований наблюдается крайне высокая частота TCR-мутантных клеток [Cole, Scopek, 1994; Kyoizumi et al., 1990; Kyoizumi et al., 1998]; 3) радиационно-индуцированная нестабильность генома действительно проявляется по TCR-локусу [Саенко А.С., Замулаева И.А., 2000; Саенко А.С. и др., 2003]; 4) больные раком ряда локализаций имеют повышенную частоту TCR-мутантных клеток [Замулаева И.А. и др., 2001; Akiyama et al., 1995a]; 5) TCR-метод обладает достаточно высокой производительностью при относительно невысокой стоимости.

В табл. 1.4.1 приведена эмпирическая функция распределения частоты TCR-мутантных клеток (на 10 000 клеток), построенная по результатам анализа 320 проб крови обследованных работников ФЭИ.

Таблица 1.4.1.

*Эмпирическая функция распределения частоты
TCR-мутантных клеток (на 10 000 клеток),
построенная по результатам анализа 320 проб крови*

Верхняя граница частоты TCR-мутантных клеток (на 10 000)	Число проб	Накопленное число проб	% от числа проб	% от накопленного числа проб
≤ 5	201	201	62,81	62,81
10	86	287	26,88	89,69
15	18	305	5,63	95,31
20	7	312	2,19	97,50
25	3	315	0,94	98,44
30	0	315	0,00	98,44
35	3	318	0,94	99,38
40	0	318	0,00	99,38
45	0	318	0,00	99,38
50	0	318	0,00	99,38
55	1	319	0,31	99,69
60	0	319	0,00	99,69
65	1	320	0,31	100,00

Минимальное зафиксированное значение частоты мутаций – 0,9 на 10 000, максимальное – 63 на 10 000, среднее значение – 5,8 на 10 000, стандартное отклонение – 6,2 на 10 000, 95 % перцентиль ≈ 15 на 10 000. Из эмпирической функции распределения определим понятие «норма». Будем считать, что граничным значением для нормы является 95 % перцентиль эмпирической функции распределения, т.е. частота мутаций меньше 15 на 10 000 соответствует норме.

Влияние достигнутого возраста на частоту TCR-мутантных клеток

Известно, что частота мутантных клеток у необлученных лиц с возрастом увеличивается [Akiyama et al., 1995b; Vijg, 2000]. Возраст обследованных лиц находился в диапазоне 23-75 лет. График рассеяния для 320 обследованных лиц в координатах «возраст – частота мутаций» приведен на рис. 1.4.10.

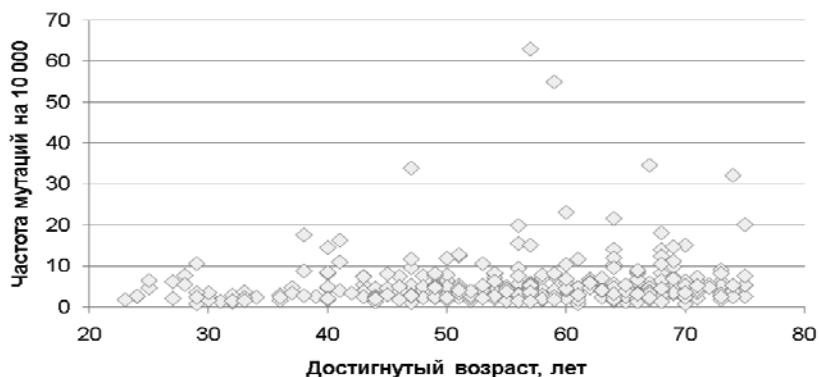


Рис. 1.4.10. Частота мутаций у обследованных лиц в зависимости от достигнутого возраста

Простой регрессионный анализ не позволяет выявить статистически значимый возрастной тренд. Отсутствие статистически значимой возрастной зависимости, предположи-

тельно, можно объяснить недостаточной численностью обследованной группы. Вместе с тем из рисунка следует, что экстремальные – выше нормы – значения частоты мутаций характерны, в основном, для возрастной группы старше 40 лет. Сгруппированные данные представлены в 2х2 таблице сопряженности «частота мутаций – возраст» (табл. 1.4.2).

Таблица 1.4.2.

Таблица сопряженности «частота мутаций – достигнутый возраст» и статистические меры

		Частота мутаций		
		выше нормы	норма	всего
Достигнутый возраст, лет	> 40	14	265	279
	≤ 40	1	40	41
	всего	15	305	320

Risk Ratio=2,06 95 % ДИ (0,28; 15,23)

Односторонний критерий Mid-P $p=0,40$

Односторонний критерий Фишера $p=0,26$

Точный критерий Фишера и критерий Mid-P, вычисленные с помощью программного обеспечения [www.OpenEpi.com], не выявили возрастных отличий в частоте мутаций. Отметим, что доля лиц старше 40 лет, у которых частота мутаций выше нормы, в два раза больше доли лиц с высокой частотой мутаций, но более молодых Risk Ratio=(14/279)/(1/41)=2,06. Но, так как нижняя граница 95 % доверительного интервала для отношения рисков меньше 1, то это отношение статистически незначимо.

Влияние профессионального облучения на частоту TCR-мутантных клеток

Был проведен простой регрессионный анализ зависимостей «частота мутаций – накопленная доза облучения»,

«частота мутаций – максимальная годовая доза облучения», «частота мутаций – средняя за период доза облучения», «частота мутаций – длительность работы с источниками ионизирующего излучения», «частота мутаций – возраст на момент начала работы с источниками ионизирующего излучения» и «частота мутаций – атрибутивный риск». Коэффициенты регрессий для каждой из проанализированных пар были статистически не значимы.

Анализ 2x2 таблиц сопряженности показал статистически значимую связь частоты мутаций с атрибутивным риском (табл. 1.4.3).

Таблица 1.4.3.

Таблица сопряженности «частота мутаций – атрибутивный риск» и статистические меры

		Частота мутаций		
		выше нормы	норма	всего
Атрибутивный риск, %	≥ 10	2	3	5
	< 10	13	302	315
	всего	15	305	320

Risk Ratio=9,7 95 % ДИ (2,9; 32,1)

Односторонний критерий Mid-P p=0,001

Односторонний критерий Фишера p=0,019

Выбор 10 % порога атрибутивного риска обусловлен опытом эксплуатации компьютерной системы оценки индивидуальных радиационных рисков АРМИР на атомных предприятиях России. Атрибутивный риск 50 % означает, что у работника вероятность развития онкологии в 2 раза выше вследствие профессиональной деятельности. Если такой человек заболит, то заболевание будет признано профессиональным, и он может рассчитывать на компенсации. Однако процедура вычисления радиационных рисков имеет значительные неопределённости как объективные, так и субъективные [Land et al., 2003; NCRP, 1997].

Учет неопределённостей значительно «сдвигает» влево пороговую величину атрибутивного риска. На практике, ввиду субъективности процесса учета неопределённостей, определение порогового значения представляет собой социально-приемлемый компромисс. Так, в атомной промышленности Великобритании действует соглашение между работодателями и профсоюзами, согласно которому компенсационные выплаты начинаются с 20 % границы [<http://csrld.org.uk>]. Применительно к формированию групп риска, эта величина была уменьшена вдвое. Численность групп риска на атомных предприятиях России, где внедрена система АРМИР [Иванов В.К. и др., 2006а; Иванов В.К. и др., 2006б; Ivanov et al., 2006; Ivanov et al., 2009], составила, в среднем, 3 % от количества работающих с источниками ионизирующего облучения. Почти 90 % персонала этих предприятий имеют атрибутивный риск солидных новообразований менее 5 %.

Как следует из табл. 1.4.3, среди обследованных лиц, у которых величина атрибутивного риска составляет 10 % и более, повышенный уровень генных мутаций по локусу Т-клеточного рецептора встречается значительно чаще: {Risk Ratio=9,7 95 % ДИ (2,9; 32,1)}. С другой стороны – почти у половины лиц, имеющих атрибутивный риск 10 % и более, частота генных мутаций соответствует условной норме. Конечно, если бы критерии были «идеальными», то все лица, у которых величина атрибутивного риска составляет 10 % и более, должны были иметь повышенный уровень генных мутаций. У абсолютного большинства лиц, имеющих повышенную частоту мутаций, атрибутивный риск меньше порогового значения. Поскольку все обследованные лица подвергались хроническому облучению в дозах, не превышающих регламентированные значения, то можно предположить, что профессиональное облучение в нормальных условиях эксплуатации не является доминирующим фактором в онкологическом риске персонала атомных предприятий.

1.5. Исследование влияния неопределённости фоновых показателей заболеваемости на прогноз радиационных рисков по моделям МКРЗ для российских популяций при однократном облучении

Модели радиационных рисков, использованные в Рекомендациях МКРЗ 2007 г. [ICRP Publication 103, 2007] для обоснования системы радиологической защиты, можно применить для прогноза радиационных рисков в российских условиях с учетом характерных для России функции дожития и повозрастных показателей онкологической заболеваемости. При этом следует иметь в виду, что существенным источником занижения оценок радиационных рисков для российских популяций и когорт может быть недостаточно полная регистрация случаев онкозаболеваний и смертей в старших возрастных группах (старше 70-ти лет).

Помимо этого, оценкам радиационных рисков присущ фундаментальный статистический разброс в силу статистического разброса фоновых показателей заболеваемости и смертности, а также статистической неопределённости оценок параметров моделей радиационных рисков. Относительный вклад таких статистических разбросов в неопределённость оценки радиационного риска увеличивается, естественно, при уменьшении численности изучаемой когорты.

Совет по изучению радиационных эффектов при Национальной академии США в 2006 г. выпустил доклад БЭИР-7 [BEIR VII, 2006], содержащий некоторый анализ неопределённостей оценки пожизненного радиационного риска. Для фактора эффективности дозы и мощности дозы (DDREF) взято среднее значение 1,5 со стандартным отклонением около 0,3, но дисперсия $\log(\text{DDREF})$ затем увеличена в 1,5 раза, опираясь на экспертную оценку ([BEIR VII, 2006], стр. 310). Поэтому самый большой вклад в дисперсию $\log(\text{LAR})$ солидных раков внёс параметр DDREF: 74 % для мужчин или 83 % для женщин. По величине вклада в раз-

брос риска солидных раков далее идёт разброс параметров моделей радиационных рисков (18 % на логарифмической шкале риска для мужчин или 11 % – для женщин) и вероятностное определение способа переноса риска с популяции на популяцию (8 % или 6 %, соответственно).

В представленной ниже работе исследовано влияние статистического разброса параметров моделей радиационных рисков и показателей онкологической заболеваемости на оценки параметров моделей радиационных рисков при однократном облучении, применительно к различным российским популяциям.

Материалы и методы

Модели МКРЗ-2007 [ICRP Publication 103, 2007] избыточного относительного риска (*ERR*) и избыточного абсолютного риска (*EAR*) для солидных раков выглядят следующим образом:

$$ERR(D, g, u, s) = a_s \cdot D \cdot \exp\{-0,017 \cdot (g - 30)\} \cdot \left(\frac{u}{70}\right)^{-1,65} \quad (1.5.1),$$

где *s* – индекс, обозначающий пол индивидуума (*s*=*м* для мужского пола и *s*=*ж* для женского); *a_м*=0,35/Гр для мужчин и *a_ж*=0,58/Гр для женщин; *u* – текущий (достигнутый) возраст в годах; *g* – возраст на момент облучения в годах; *D* – поглощённая доза, Гр.

$$EAR(D, g, u, s) = a_s \cdot D \cdot \exp\{-0,024 \cdot (g - 30)\} \cdot \left(\frac{u}{70}\right)^{2,38} \quad (1.5.2),$$

где *a_м*=432·10⁻⁵/Гр для мужчин и *a_ж*=598,3·10⁻⁵/Гр для женщин; остальные обозначения соответствуют (1.5.1).

Риск лейкозов даётся в виде модели избыточного абсолютного риска:

$$EAR(D, g, t, s) = a_s(g) \cdot D(1 + 0,79 \cdot D) \cdot \exp(\beta_s(g) \cdot (t - 25)) \quad (1.5.3),$$

где *t* – время, прошедшее после облучения, в годах (текущий

возраст $u=g+t$). Избыточный абсолютный риск EAR имеет размерность чел./год на 100 тыс. человек и зависит не только от возраста на момент облучения g , но и от времени t , прошедшего после облучения. Для лейкозов зависимость EAR от дозы D уже линейно-квадратичная. Латентный период для лейкозов принят равным 2 годам. В табл. 1.5.1 приведены значения параметров a_s и β_s модели (1.5.3) в зависимости от возраста при облучении g для мужчин и женщин.

Таблица 1.5.1.

Значения параметров избыточного абсолютного риска EAR заболеваемости лейкозами

Возраст при облучении g , лет	Мужчины		Женщины	
	a_m , Зв ⁻¹	β_m , год ⁻¹	$a_{ж}$, Зв ⁻¹	$\beta_{ж}$, год ⁻¹
0-19	3,3	-0,17	6,6	-0,07
20-39	4,8	-0,13	9,7	-0,03
> 39	13,1	-0,07	26,4	0,03

Рассмотрим модели солидных раков. Модели (1.5.1) и (1.5.2) имеют одну и ту же форму:

$$ER(D, g, u, s) = a_s \cdot D \cdot \exp(\alpha \cdot g^*) \cdot (u^*)^\omega \quad (1.5.4),$$

где ER – избыточный риск, относительный или абсолютный, $g^* = (g-30)/10$ и $u^* = u/70$ – центрированные возраста в соответствии с (1.5.1) и (1.5.2), оценки параметров a_s , α , ω и их стандартные ошибки приведены ниже в табл. 1.5.2. Стандартные ошибки параметров в данном случае были приближённо рассчитаны из их доверительных интервалов, приведённых в [Preston et al., 2007] (с. 15, табл. 10).

Стандартные ошибки параметров модели лейкозов (1.5.3), приведённые в табл. 1.5.3, приближённо рассчитаны из таблицы числа избыточных радиационных лейкозов, приведённых в [Preston et al., 1994] (с. 76, табл. V). Сведения для расчёта стандартной ошибки параметра β_s в [Preston et al., 1994] отсутствуют.

Таблица 1.5.2.

Оценки параметров моделей избыточного относительного и абсолютного рисков и их стандартные ошибки, согласно [Preston et al., 2007], для солидных раков (1.5.4)

Модель	Пол, s	a_s	Ст. ошибка a_s	ω	Ст. ошибка ω	α	Ст. ошибка α
ERR	м	0,35	0,0457	-1,65	0,27439	-0,17	0,05488
ERR	ж	0,58	0,0793	-1,65	0,27439	-0,17	0,05488
EAR	м	432,0	67,07	2,38	0,27439	-0,24	0,04878
EAR	ж	598,3	54,88	2,38	0,27439	-0,24	0,04878

Таблица 1.5.3.

Оценки параметров модели избыточного абсолютного риска EAR лейкозов (1.5.3) и их стандартные ошибки, согласно [Preston et al., 1994]

Возраст g , лет	Пол, s	a_s	Ст. ошибка a_s	β_s	Ст. ошибка β_s
0-19	м	3,3	0,56	-0,17	0
20-39	м	4,8	1,31	-0,13	0
> 39	м	13,1	2,63	-0,07	0
0-19	ж	6,6	1,30	-0,07	0
20-39	ж	9,7	1,92	-0,03	0
> 39	ж	26,4	5,15	0,03	0

При вычислении стандартных ошибок было сделано допущение, что оценки параметров – нормально распределённые случайные величины, так как были получены в [Preston et al., 1994] и [Preston et al., 2007] методом максимального правдоподобия (оценки максимального правдоподобия, ОМП, – асимптотически нормально распределены). Очевидно, что в силу нелинейности соотношения (1.5.4), распространение разброса параметров на величины ERR или EAR может быть оценено только с помощью имитационного

моделирования.

В дальнейшем с помощью генератора независимо распределённых нормальных случайных величин было получено по 250 реализаций параметров a_s , α , ω для 4-х вариантов модели (1.5.4) – для мужского и женского пола в вариантах ERR и EAR, т.е. 1000 реализаций моделей для прогноза избыточного радиационного риска. Приближение статистической независимости оценок параметров a_s , α , ω , как показано в [NCI-CDC, 2003], для солидных раков является приемлемым.

Для модели лейкозов (1.5.3), поскольку единственным известным количественно источником статистического разброса является коэффициент удельного радиационного риска a_s , все остальные члены формулы (1.5.3) образуют масштабный множитель. Поэтому для лейкозов в данном случае учёт разброса параметров модели является тривиальной задачей: чтобы получить стандартное отклонение годового избыточного относительного риска, надо умножить стандартное отклонение коэффициента a_s на $D(1 + 0,79 \cdot D) \cdot \exp(\beta_s(g) \cdot (t - 25))$. Например, максимальный избыточный абсолютный риск лейкозов у мужчин, облучённых в возрасте 30 лет дозой 0,1 Гр, достигается сразу после 2-летнего латентного периода и равен $10,9 \cdot 10^{-5}/\text{год}$ при стандартном отклонении $2,98 \cdot 10^{-5}/\text{год}$. Данная тривиальная задача более подробно не рассматривается.

При моделировании процессов с использованием генератора случайных чисел в зависимости от рассматриваемой задачи необходим набор случайных величин, распределённых по различным законам. Для получения случайных величин с заданным законом распределения или в необходимом интервале достаточно преобразовать заранее сгенерированные равномерно распределённые случайные числа из интервала (0; 1).

Для преобразования равномерного на интервале (0; 1) распределения в нормальное был использован метод Вох-

Muller [Box, Muller, 1958], т.е. преобразование вида $X = (\sqrt{-2 \ln U} \cdot \sin(2\pi V))$, где U и V – независимые равномерно распределённые на интервале (0; 1) случайные величины.

Оценка статистического разброса показателей заболеваемости проводилась в предположении пуассоновского процесса заболеваемости, т.е. при условии, что дисперсия абсолютного числа случаев заболеваний и число заболеваний равны.

Численные расчёты проводились с использованием медико-демографических данных популяций г. Обнинска, Людиново, Калужской области и России в целом (табл. 1.5.4–1.5.11), а также данных онкозаболеваемости по России за 2001–2005 гг. [Чиссов В.И. и др., 2003; Чиссов В.И. и др., 2004; Чиссов В.И. и др., 2006; Чиссов В.И. и др., 2007].

Таблица 1.5.4.

*Повозрастные показатели заболеваемости
(на 100 тыс. чел.-лет) всеми злокачественными
новообразованиями (код МКБ-10: C00-C97)
за период 2001–2005 гг. (мужчины)*

Возраст на момент диагноза, лет	Административная территория			
	г. Обнинск	г. Людиново	Калужская область	Россия*
0-14	20,9	5,5	12,5	11,3
15-19	16,4	0	17,5	15,6
20-24	39,5	26,8	24	21,2
25-29	46,8	40,6	34,3	23,9
30-34	59,7	0	43,3	34,4
35-39	76,8	42,5	53,8	53,5
40-44	127,6	161,7	113,9	104,7
45-49	217,3	264,9	277	234,2
50-54	445	749	548	477,1
55-59	854,1	1105,4	1075,7	1121,8
60 и более	1735	1757,5	1724,8	1548,1
Итого	394,5	370,6	404,7	328,3

Таблица 1.5.5.

*Повозрастные показатели заболеваемости
(на 100 тыс. чел.-лет) злокачественными новообразованиями
лимфоидной, кроветворной и родственных им тканей
(код МКБ-10: С81-С96) за период 2001–2005 гг. (мужчины)*

Возраст на момент диагноза, лет	Административная территория			
	г. Обнинск	г. Людиново	Калужская область	Россия*
0-14	7,8	5,5	5,2	5,3
15-19	8,2	0	10,1	6,6
20-24	4,9	13,4	9,4	7,4
25-29	17,6	27,1	9,7	7
30-34	23,9	0	9,1	6,8
35-39	10,2	0	7,3	7,4
40-44	13,2	21,6	9,4	9
45-49	21,2	11	15,3	14,1
50-54	36,6	13,9	21,2	21,9
55-59	46,9	34,5	42,9	44,6
60 и более	82,3	55,7	65,7	51,3
Итого	26,7	16,7	20,2	16

Таблица 1.5.6.

*Повозрастные показатели заболеваемости
(на 100 тыс. чел.-лет) всеми злокачественными
новообразованиями (код МКБ-10: С00-С97) за период
2001–2005 гг. (женщины)*

Возраст на момент диагноза, лет	Административная территория			
	г. Обнинск	г. Людиново	Калужская область	Россия*
0-14	13,9	18	11,3	10
15-19	12,5	12,3	17,1	13,8
20-24	25	25,4	28	24,5
25-29	85,7	53,4	47,1	43,7

Возраст на момент диагноза, лет	Административная территория			
	г. Обнинск	г. Людиново	Калужская область	Россия*
30-34	53,8	86,4	82,8	77,5
35-39	168,6	118	116,5	111,4
40-44	232	305,3	207,6	182,6
45-49	379,3	300,3	336	315,6
50-54	560,8	549,1	459	452,7
55-59	860,6	954,8	764,1	845
60 и более	1121	784,2	905,4	878,3
Итого	405,6	329,1	367	326,9

Таблица 1.5.7.

Повозрастные показатели заболеваемости (на 100 000 чел.-лет) злокачественными новообразованиями лимфоидной, кроветворной и родственных им тканей (код МКБ-10: C81-C96) за период 2001–2005 гг. (женщины)

Возраст на момент диагноза, лет	Административная территория			
	г. Обнинск	г. Людиново	Калужская область	Россия*
0-14	5,6	12	4,5	4,2
15-19	4,2	12,3	3,2	5,5
20-24	5	12,7	9	7,3
25-29	5,7	26,7	8	7,4
30-34	10,8	28,8	10,6	7,8
35-39	22,8	0	8	6,9
40-44	15,2	19,1	10,7	7,4
45-49	17,4	30	9,5	11,2
50-54	23	12,2	18,8	16,6
55-59	29,4	0	23,4	31,8
60 и более	60	30,8	38,1	34
Итого	23,2	19,4	17,1	14,8

Таблица 1.5.8.

*Численность жителей г. Обнинска по данным переписи
2002 года*

Возраст, лет	Мужчины	Женщины	Оба пола
0-14	7656	7190	14846
15-19	4883	4816	9699
20-24	4050	3997	8047
25-29	3416	3501	6917
30-34	3348	3717	7065
35-39	3907	4389	8296
40-44	4547	5258	9805
45-49	3774	4587	8361
50-54	3281	4351	7632
55-59	2131	2719	4850
60 и более	7781	12328	20109
Итого	48774	56853	105627

Таблица 1.5.9.

*Численность жителей г. Людиново по данным переписи
2002 года*

Возраст, лет	Мужчины	Женщины	Оба пола
0-14	3632	3337	6969
15-19	1646	1630	3276
20-24	1495	1575	3070
25-29	1477	1498	2975
30-34	1291	1389	2680
35-39	1413	1525	2938
40-44	1855	2096	3951
45-49	1812	1998	3810
50-54	1442	1639	3081
55-59	579	775	1354
60 и более	2515	5203	7718
Итого	19157	22665	41822

Таблица 1.5.10.

Численность жителей Калужской области по данным переписи 2002 года

Возраст, лет	Мужчины	Женщины	Оба пола
0-14	80059	76001	156060
15-19	43437	43164	86601
20-24	38389	37828	76217
25-29	34972	34791	69763
30-34	32830	33819	66649
35-39	35658	37604	73262
40-44	44795	48653	93448
45-49	41953	46375	88328
50-54	35767	41570	77337
55-59	18202	23033	41235
60 и более	76682	151066	227748
Итого	482744	573904	1056648

Таблица 1.5.11.

Численность жителей России по данным переписи 2002 года

Возраст, лет	Мужчины	Женщины	Оба пола
0-14	11859113	11274911	23134024
15-19	6275111	6073426	12348537
20-24	5598784	5504938	11103722
25-29	5243556	5195218	10438774
30-34	4994225	4744694	9738919
35-39	4952094	5039220	9991314
40-44	6037332	6352408	12389740
45-49	5589465	6155935	11745400
50-54	4690817	5481095	10171912
55-59	2422708	3039256	5461964
60 и более	9118307	17415683	26533990
Итого	66781512	76276784	1.43E+08

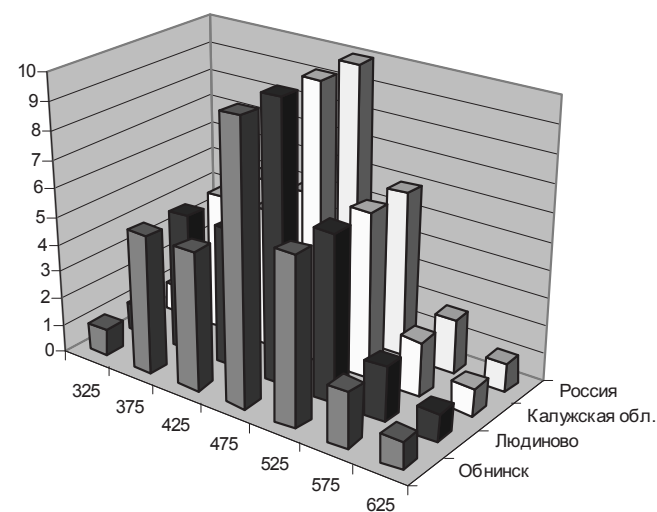
Результаты и обсуждение

Из (1.5.4) следует, что при $g=30$ и $u=70$ ошибки коэффициентов α и ω не распространяются на EAR и ERR, т.е. для возраста при облучении 30 лет в возрасте 70 лет достигается минимум дисперсии прогнозируемого избыточного абсолютного риска (на логарифмической шкале).

Результаты учёта статистического разброса значений параметров моделей радиационных рисков

С учётом величины случайного разброса значений параметров a_s , α , ω в (1.5.4), форма вероятностного распределения избыточного абсолютного риска солидных раков в достигнутом возрасте 70 лет при облучении дозой 1 Гр в возрасте 30 лет, согласно модели EAR (1.5.2), EAR($D=1$ Гр, $g=30$ лет, $u=70$ лет), для мужчин и женщин, представлена на рис. 1.5.1 (для мужчин) и рис. 1.5.2 (для женщин). Данные приведены по популяциям г. Обнинска, Людиново, Калужской области и России в целом. В ячейках таблиц под рисунками указаны частоты гистограмм в последовательных интервалах избыточного риска шириной по 50 на 100 тыс. чел.-лет. В качестве заголовков колонок используются правые точки среза интервалов гистограммы, например, на рис. 1.5.1 первая колонка – значения EAR от 275 до 325 на 100 тыс. чел.-лет, вторая колонка – значения EAR от 325 до 375 на 100 тыс. чел.-лет, и т.д.

На рис. 1.5.3 и 1.5.4 приведены формы вероятностного распределения избыточного абсолютного риска солидных раков в достигнутом возрасте 70 лет при облучении дозой 1 Гр в возрасте 30 лет, согласно модели ERR (1.5.1), ERR($D=1$ Гр, $g=30$ лет, $u=70$ лет), для мужчин и женщин. Данные приведены по популяциям г. Обнинска, Людиново, Калужской области и России в целом. Обозначения такие же, как на рис. 1.5.1 и 1.5.2. Для вычисления распределения

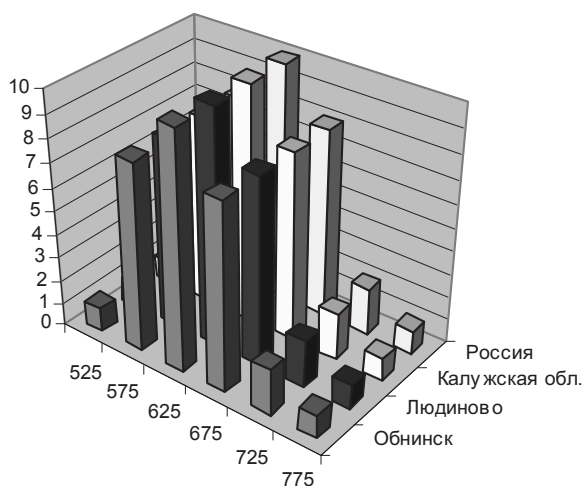


	325	375	425	475	525	575	625
Обнинск	1	5	5	10	6	2	1
Людиново	1	5	5	10	6	2	1
Калужская обл.	1	5	5	10	6	2	1
Россия	1	5	5	10	6	2	1

■ Обнинск ■ Людиново □ Калужская обл. □ Россия

Рис. 1.5.1. Гистограмма вероятностного распределения избыточного абсолютного риска солидных раков ($EAR \cdot 10^5$) в достигнутом возрасте 70 лет при облучении дозой 1 Гр в возрасте 30 лет, согласно модели EAR (1.5.2), $EAR(D=1 \text{ Гр}, g=30 \text{ лет}, u=70 \text{ лет})$, для мужчин. Частоты гистограмм приведены в последовательных интервалах избыточного абсолютного риска шириной по 50 на 100 тыс. чел.-лет

избыточного абсолютного риска по модели ERR значение относительной величины ERR умножалось на значение фоновый показатель заболеваемости солидными раками в возрасте 70 лет, по каждой из рассматриваемых популяций. Значения фоновых показателей на этом этапе анализа принимались детерминированными величинами, не имеющими статистического разброса.

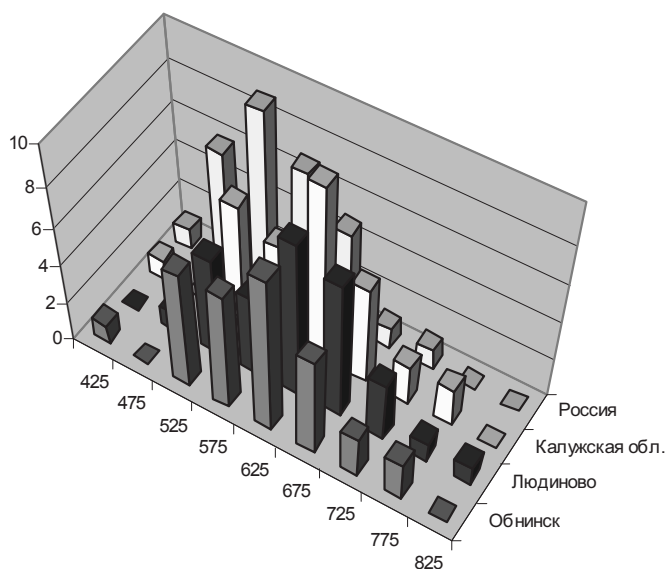


	525	575	625	675	725	775
■ Обнинск	1	8	10	8	2	1
■ Людиново	1	8	10	8	2	1
□ Калужская обл.	1	8	10	8	2	1
□ Россия	1	8	10	8	2	1

■ Обнинск ■ Людиново □ Калужская обл. □ Россия

Рис. 1.5.2. Гистограмма вероятностного распределения избыточного абсолютного риска солидных раков ($EAR \cdot 10^5$) в достигнутом возрасте 70 лет при облучении дозой 1 Гр в возрасте 30 лет, согласно модели EAR (1.5.2), $EAR(D=1 \text{ Гр}, g=30 \text{ лет}, u=70 \text{ лет})$, для женщин. Частоты гистограмм приведены в последовательных интервалах избыточного абсолютного риска шириной по 50 на 100 тыс. чел.-лет

Как и следовало ожидать, распределение избыточного абсолютного риска, рассчитанного по модели EAR (1.5.2), одинаково для всех популяций, так как опирается только на модельные параметры. Распределение избыточного абсолютного риска, рассчитанного по модели ERR (1.5.1), различно для разных популяций, так как использует статистические данные о фоновых показателях заболеваемости солидными раками по каждой из популяций.



	425	475	525	575	625	675	725	775	825
Обнинск	1	0	6	6	8	5	2	2	0
Людиново	0	1	5	4	8	7	3	1	1
Калужская обл.	1	0	6	5	9	5	2	2	0
Россия	1	6	9	7	5	1	1	0	0

■ Обнинск ■ Людиново □ Калужская обл. □ Россия

Рис. 1.5.3. Гистограмма вероятностного распределения избыточного абсолютного риска солидных раков ($EAR \cdot 10^5$) в достигнутом возрасте 70 лет при облучении дозой 1 Гр в возрасте 30 лет, согласно модели ERR (1.5.1), $ERR(D=1 \text{ Гр}, g=30 \text{ лет}, u=70 \text{ лет})$, для мужчин. Частоты гистограмм приведены в последовательных интервалах избыточного абсолютного риска шириной по 50 на 100 тыс. чел.-лет

Формы всех четырёх распределений (рис. 1.5.1-1.5.4) достаточно симметричны, несмотря на относительные сдвиги наиболее вероятных значений риска для разных популяций в случае прогноза по модели избыточного риска ERR (1.5.1). Это позволяет достаточно полно охарактеризовать

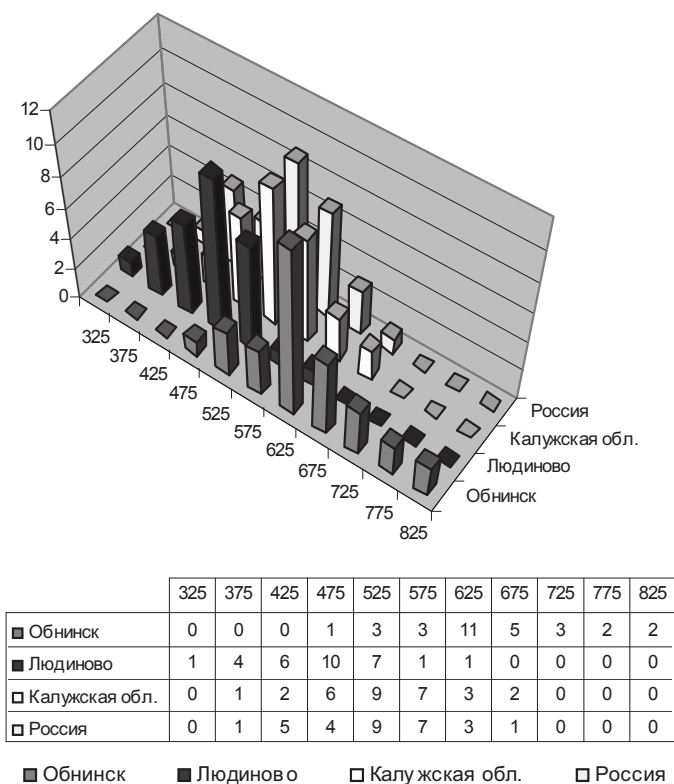


Рис. 1.5.4. Гистограмма вероятностного распределения избыточного абсолютного риска солидных раков ($EAR \cdot 10^5$) в достигнутом возрасте 70 лет при облучении дозой 1 Гр в возрасте 30 лет, согласно модели ERR (1.5.1), $ERR(D=1 \text{ Гр}, g=30 \text{ лет}, u=70 \text{ лет})$, для женщин. Частоты гистограмм приведены в последовательных интервалах избыточного абсолютного риска шириной по 50 на 100 тыс. чел.-лет

разброс значений избыточного абсолютного риска его дисперсией (или среднеквадратичным отклонением). В этом случае доверительные интервалы избыточного абсолютного риска также можно приближённо определить, считая распределение риска нормальным.

Вполне ожидаемым является факт, что в зависимости

от возраста при облучении и достигнутого возраста соотношение между средними значениями избыточных абсолютных рисков солидных раков, прогнозируемых для российских популяций с помощью моделей EAR и ERR, могут значительно различаться. Это объясняется тем, что модели были идентифицированы на японской популяции, и на российской популяции их согласованность хуже.

Более важным и заранее неочевидным результатом проведённого имитационного моделирования является то, что, в зависимости от возраста при облучении и достигнутого возраста, соотношение между *дисперсиями* избыточных абсолютных рисков солидных раков, прогнозируемых с помощью моделей EAR и ERR, также могут значительно различаться.

Результаты учёта статистического разброса спонтанных показателей заболеваемости

Поскольку для лейкозов применяется одна аддитивная модель (EAR, ф-ла (1.5.3)), статистический разброс половозрастных показателей спонтанной заболеваемости лейкозами на оценке вероятности возникновения радиационно-обусловленных лейкозов не сказывается, а проблема переноса риска между популяциями для лейкозов в настоящее время не формализована. Дальнейшее рассмотрение относится к солидным ракам.

На рис. 1.5.5–1.5.8 разброс прогнозируемого избыточного абсолютного риска солидных раков демонстрируется величиной 90 % доверительных интервалов. Рис. 1.5.9 и 1.5.10 соответствуют риску в 70 лет при облучении в 30 лет, а рис. 1.5.7 и 1.5.8 – риску в 100 лет при облучении в 1 год. Так же, как и без учёта разброса спонтанных показателей заболеваемости, между этими двумя вариантами сохраняются существенные различия.

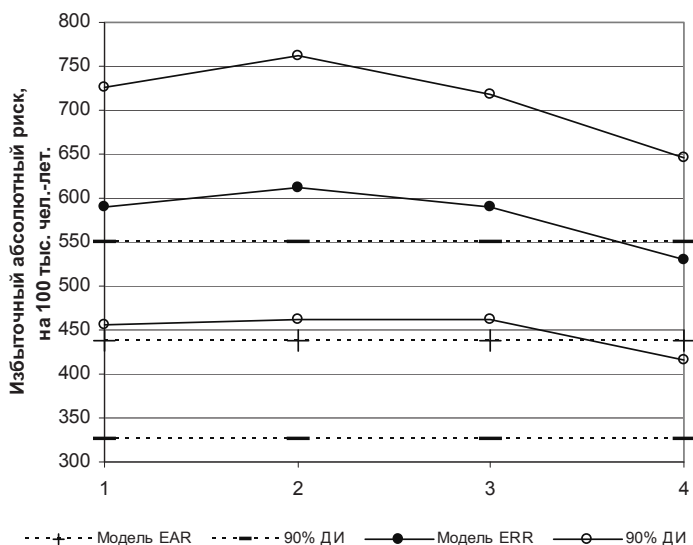


Рис. 1.5.5. Мужчины. Избыточный абсолютный риск солидных раков в достигнутом возрасте 70 лет при облучении дозой 1 Гр в возрасте 30 лет, с 90 % доверительными интервалами (90 % ДИ), согласно моделям EAR и ERR, в четырёх популяциях (по горизонтали): 1 – г. Обнинск Калужской области, 2 – г. Людиново Калужской области, 3 – Калужская область, 4 – Россия. Разброс рисков обусловлен разбросом модельных параметров и статистическим разбросом фоновых показателей заболеваемости. Точки, соответствующие разным популяциям, соединены для наглядности демонстрации (практически одинаковой) ширины доверительных интервалов

Рис. 1.5.5 и 1.5.6 (риск в возрасте 70 лет при облучении в возрасте 30 лет) показывают, что доверительные интервалы прогнозов риска по моделям EAR и ERR имеют приблизительно одинаковую величину, а средние значения прогнозов по этим разным моделям близки друг другу; наблюдается тенденция больших прогнозных значений избыточного абсолютного риска по моделям ERR, по сравнению с моделями EAR, для мужчин, и обратное соотношение – для женщин.

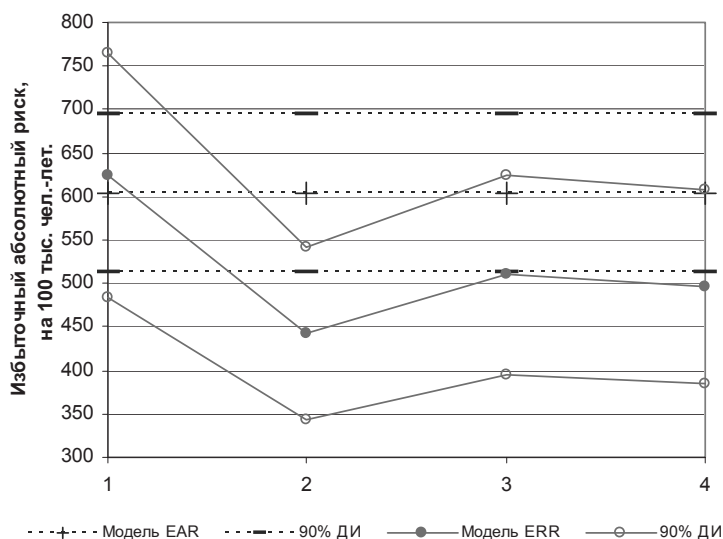


Рис. 1.5.6. Женщины. Избыточный абсолютный риск солидных раков в достигнутом возрасте 70 лет при облучении дозой 1 Гр в возрасте 30 лет, с 90 % доверительными интервалами (90 % ДИ), согласно моделям EAR и ERR, в четырёх популяциях (по горизонтали): 1 – г. Обнинск Калужской области, 2 – г. Людиново Калужской области, 3 – Калужская область, 4 – Россия. Разброс рисков обусловлен *разбросом модельных параметров и статистическим разбросом фоновых показателей заболеваемости*. Точки, соответствующие разным популяциям, соединены для наглядности демонстрации (практически одинаковой) ширины доверительных интервалов

Табл. 1.5.12 даёт представление об увеличении разброса прогнозируемого согласно модели ERR избыточного абсолютного риска солидных раков в достигнутом возрасте 70 лет при облучении дозой 1 Гр в возрасте 30 лет, при учёте разброса фоновых показателей, которыми характеризуется популяция. Относительный вклад от статистического разброса фоновых показателей в увеличение стандартного отклонения прогнозируемого риска не превышает 15,5 % по всем рассмотренным популяциям. Это максимальное значе-

ние достигается для популяции г. Людиново, имеющей минимальную численность.

Таблица 1.5.12.

Стандартное отклонение избыточного абсолютного риска (на 100 тыс. чел./год) солидных раков в достигнутом возрасте 70 лет при облучении дозой 1 Гр в возрасте 30 лет, согласно модели ERR, без учёта разброса фоновых показателей и с учётом разброса фоновых показателей

Пол	Популяция	Длит. периода сбора стат. данных, лет	Чел.-годы под наблюдением	Ст. откл. риска без учёта разброса фоновых показателей	Ст. откл. риска с учётом разброса фоновых показателей	Увеличение ст. откл., %
муж.	г. Обнинск	5	243870	76,79	81,89	6,64
муж.	г. Людиново	5	95785	79,07	91,29	15,46
муж.	Калужская обл.	5	2413720	77,08	78,13	1,36
муж.	Россия	2	133563024	69,54	69,65	0,16
жен.	г. Обнинск	5	284265	85,54	90,79	6,14
жен.	г. Людиново	5	113325	60,74	70,15	15,48
жен.	Калужская обл.	5	2869520	69,92	70,80	1,26
жен.	Россия	2	152553568	68,07	68,17	0,15

Однако, среднее значение прогнозируемого избыточного абсолютного риска при учёте разброса фоновых показателей также увеличивается из-за того, что фоновые показатели входят в прогнозируемый по модели ERR риск в виде сомножителя, т.е. вносимый ими разброс имеет мультипликативный характер. Из табл. 1.5.13 видно, что относительное смещение (увеличение) среднего избыточного абсолютного риска за счёт разброса фоновых показателей достигает 1,5 % (г. Людиново).

Таблица 1.5.13.

*Средний избыточный абсолютный риск
(на 100 тыс. чел./год) солидных раков в достигнутом
возрасте 70 лет при облучении дозой 1 Гр в возрасте
30 лет, согласно модели ERR, без учёта разброса фоновых
показателей и с учётом разброса фоновых показателей*

Пол	Популяция	Длит. периода сбора стат. данных, лет	Чел.-годы под на- блюдени- ем	Изб. абс. риск ×10-5/год без учёта разброса фоновых показателей	Изб абс. риск ×10-5/год с учётом раз- броса фо- новых по- казателей	Увели- чение средне- го зна- чения риска, %
муж.	г. Обнинск	5	243870	585,92	590,84	0,84
муж.	г. Людиново	5	95785	603,31	612,09	1,45
муж.	Калужская обл.	5	2413720	588,16	589,73	0,27
муж.	Россия	2	133563024	530,64	530,85	0,04
жен.	г. Обнинск	5	284265	623,69	628,90	0,83
жен.	г. Людиново	5	113325	442,88	449,63	1,52
жен.	Калужская обл.	5	2869520	509,83	511,18	0,26
жен.	Россия	2	152553568	496,31	496,51	0,04

На рис. 1.5.7 и 1.5.8 (риск в возрасте 100 лет при облучении в возрасте 1 год) доверительные интервалы прогнозов риска по модели EAR существенно шире, чем для прогнозов по модели ERR. Как для мужчин, так и для женщин средние значения прогнозов по модели EAR в разы выше, чем по модели ERR ($p < 0,001$), а различия прогноза между популяциями пренебрежимо малы по сравнению с различиями прогноза по разным моделям.

В табл. 1.5.14 приведено увеличение разброса прогнозируемого согласно модели ERR избыточного абсолютного риска солидных раков в достигнутом возрасте 100 лет при облучении дозой 1 Гр в возрасте 1 год, при учёте разброса фоновых показателей, которыми характеризуется популяция. Относительный вклад от статистического разброса фо-

новых показателей в увеличение стандартного отклонения прогнозируемого риска для данной комбинации возрастов (1 год при облучении и 100 лет достигнутого возраста) не превышает 6,3 % (г. Людиново) по всем рассмотренным популяциям. Из табл. 1.5.15 видно, что относительное смещение (увеличение) среднего избыточного абсолютного риска за счёт разброса фоновых показателей достигает 1,65 % (г. Людиново).

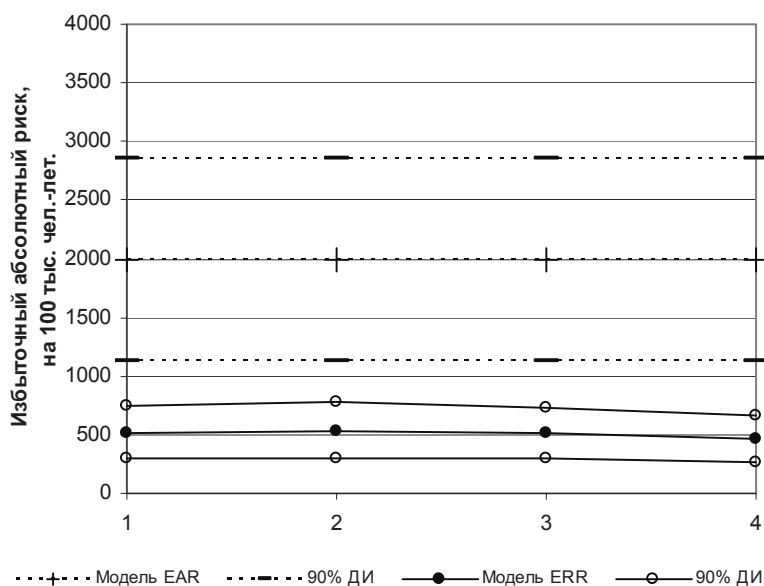


Рис. 1.5.7. Мужчины. Избыточный абсолютный риск солидных раков в достигнутом возрасте 100 лет при облучении дозой 1 Гр в возрасте 1 год, с 90 % доверительными интервалами (90 % ДИ), согласно моделям EAR и ERR, в четырёх популяциях (по горизонтали): 1 – г. Обнинск Калужской области, 2 – г. Людиново Калужской области, 3 – Калужская область, 4 – Россия. Разброс рисков обусловлен разбросом модельных параметров и статистическим разбросом фоновых показателей заболеваемости. Точки, соответствующие разным популяциям, соединены для наглядности демонстрации ширины доверительных интервалов

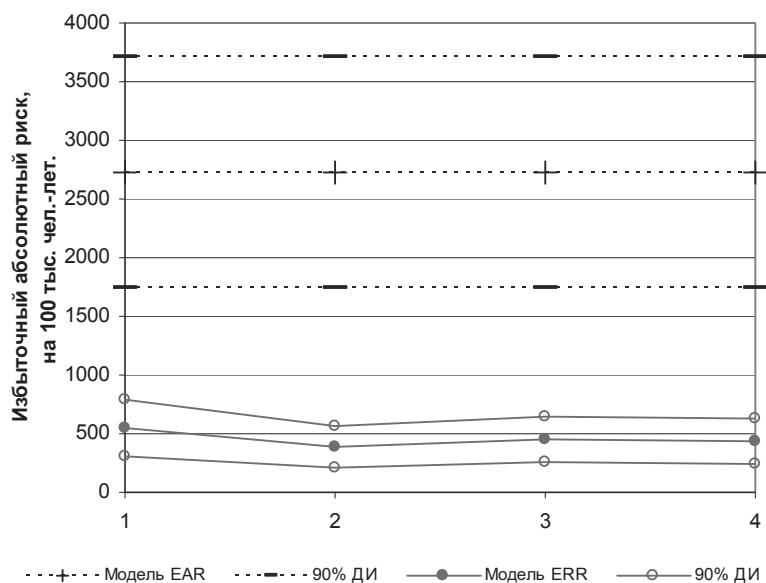


Рис. 1.5.8. Женщины. Избыточный абсолютный риск солидных раков в достигнутом возрасте 100 лет при облучении дозой 1 Гр в возрасте 1 год, с 90 % доверительными интервалами (90 % ДИ), согласно моделям EAR и ERR, в четырёх популяциях (по горизонтали): 1 – г. Обнинск Калужской области, 2 – г. Людиново Калужской области, 3 – Калужская область, 4 – Россия. Разброс рисков обусловлен разбросом модельных параметров и статистическим разбросом фоновых показателей заболеваемости. Точки, соответствующие разным популяциям, соединены для наглядности демонстрации ширины доверительных интервалов

Таким образом, в ситуации однократного острого облучения:

- статистический разброс фоновых показателей заболеваемости солидными раками, определённых на основе около 200 тыс. человеко-лет наблюдений (г. Людиново, 5 лет наблюдений), приводит к относительному увеличению среднего значения прогнозируемого риска до 1,6 % и к относительному увеличению стандартного отклонения про-

гноза до 15,5 %;

- статистический разброс фоновых показателей заболеваемости солидными раками, определённых на основе около 500 тыс. человеко-лет наблюдений (г. Обнинск, 5 лет наблюдений), приводит к относительному увеличению среднего значения прогнозируемого риска до 1 % и к относительному увеличению стандартного отклонения прогноза до 6,6 %;

- статистическим разбросом фоновых показателей заболеваемости солидными раками, определённых на основе около 5 млн. человеко-лет наблюдений (Калужская область, 5 лет наблюдений), при прогнозе радиационного риска можно пренебречь.

Таблица 1.5.14.

Стандартное отклонение избыточного абсолютного риска (на 100 тыс. чел./год) солидных раков в достигнутом возрасте 100 лет при облучении дозой 1 Гр в возрасте 1 год, согласно модели ERR, без учёта разброса фоновых показателей и с учётом разброса фоновых показателей

Пол	Популяция	Длит. периода сбора стат. данных, лет	Чел.-годы под наблюдением	Ст. откл. риска без учёта разброса фоновых показателей	Ст. откл. риска с учётом разброса фоновых показателей	Увеличение ст. откл., %
муж.	г. Обнинск	5	243870	132,39	136,03	2,75
муж.	г. Людиново	5	95785	136,31	144,55	6,04
муж.	Калужская обл.	5	2413720	132,89	133,75	0,65
муж.	Россия	2	133563024	119,89	120,00	0,08
жен.	г. Обнинск	5	284265	143,20	147,00	2,65
жен.	г. Людиново	5	113325	101,68	108,09	6,30
жен.	Калужская обл.	5	2869520	117,06	117,78	0,62
жен.	Россия	2	152553568	113,95	114,04	0,08

Таблица 1.5.15.

*Средний избыточный абсолютный риск
(на 100 тыс. чел./год) солидных раков в достигнутом
возрасте 100 лет при облучении дозой 1 Гр в возрасте 1 год,
согласно модели ERR, без учёта разброса фоновых
показателей и с учётом разброса фоновых показателей*

Пол	Популяция	Длит. периода сбора стат. данных, лет	Чел.-годы под на- блюдени- ем	Изб. абс. риск $\times 10^{-5}/\text{год}$ без учёта разброса фоновых показате- лей	Изб. абс. риск $\times 10^{-5}/\text{год}$ с учётом разброса фоновых показате- лей	Увели- чение среднего значе- ния рис- ка, %
муж.	г. Обнинск	5	243870	513,85	518,51	0,91
муж.	г. Людиново	5	95785	529,10	537,42	1,57
муж.	Калужская обл.	5	2413720	515,81	517,30	0,29
муж.	Россия	2	133563024	465,36	465,57	0,04
жен.	г. Обнинск	5	284265	547,19	552,13	0,90
жен.	г. Людиново	5	113325	388,56	394,96	1,65
жен.	Калужская обл.	5	2869520	447,30	448,57	0,28
жен.	Россия	2	152553568	435,44	435,62	0,04

1.6. Количественная оценка вероятности возникновения радиационно-индуцированных заболеваний вследствие внутреннего облучения

Основы государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2010 года и дальнейшую перспективу (Пр-2196) от 4 декабря 2003 г. в качестве одной из основных задач указывают следующую:

«11. Для решения задач по повышению уровня ядерной

и радиационной безопасности населения и окружающей среды необходимо: 1) внедрить современные методы и средства комплексного анализа и прогнозирования состояния ядерной и радиационной безопасности, а также управления им с использованием показателей рисков...»

Оценка вреда здоровью человека (или радиационного риска), обусловленного внутренним облучением, в настоящее время является актуальной задачей, решение которой имеет определённые методические трудности. Вместе с тем, для некоторых предприятий атомной отрасли, в частности, для радиохимических заводов, горнодобывающих и перерабатывающих предприятий, основной вред здоровью может быть связан именно с внутренним облучением.

Современные Рекомендации МКРЗ 2007 г. (п. 156) [МКРЗ Публикация 103, 2009] содержат указание на то, что в случае больших доз, превышающих ограничения и пределы для персонала, грубую оценку вреда можно получить с использованием эффективной дозы: «При ретроспективной оценке доз у отдельных индивидуумов, дозы у которых могли существенно превысить пределы дозы, эффективная доза может дать первую приблизительную оценку суммарного вреда». Однако (там же): «Если доза излучения и радиационный риск должны быть оценены более точно, необходимо провести дальнейшие детальные оценки доз в органах или тканях, особенно тогда, когда необходимо оценить специфические риски для органов отдельных индивидуумов».

В настоящее время средняя годовая эффективная доза облучения персонала в нормальных условиях работы предприятий атомной отрасли составляет около 2 мЗв, в некоторых случаях для небольшой группы лиц достигая примерно 10 мЗв, т.е. гораздо ниже пределов доз для персонала. В этом случае представляет интерес вопрос о том, насколько сильно могут отличаться оценки вреда здоровью (или радиационного риска), полученные с помощью эффективной дозы, по сравнению с «правильным» расчётом по поглощённой или эквивалентной дозе в органе или ткани.

Материалы и методы

Вред здоровью с точки зрения специалистов МКРЗ является многокомпонентной характеристикой. «Его основными компонентами являются величины стохастического характера: вероятность развития смертельного радиационно-индуцированного онкологического заболевания, взвешенная вероятность развития наследственных радиационных эффектов и число лет жизни, потерянных в результате нанесения радиационного вреда» [МКРЗ Публикация 103, 2009].

Рассмотрим, прежде всего, вероятность развития смертельного радиационно-индуцированного онкологического заболевания, как главную компоненту вреда при малых дозах облучения. Традиционно такая вероятность выражается в форме пожизненного избыточного атрибутивного риска (*LAR*), который должен оцениваться по эквивалентным дозам в органах и тканях, так как опирается на радиационно-эпидемиологические оценки погодовых рисков (на погодовые вероятности возникновения радиационно-индуцированных стохастических эффектов), полученных, как правило, при однократном облучении, и зависящих от поглощённой дозы (*D*) (или эквивалентной дозы *H*) и модифицирующих риск параметров (пол, возраст при облучении, достигнутый возраст и т.п.) [МКРЗ, Публикация 103, 2009]. Далее такой риск будем обозначать *LAR_{орг}*.

Хорошо известно, что, зная погодовой избыточный абсолютный риск (*EAR*) в достигнутом возрасте *a* для человека пола *s*, можно оценить *LAR_{орг}* рака локализации *l* после однократного облучения в возрасте *g* дозой *D*. Он рассчитывается суммированием значений избыточного абсолютного риска с учётом вероятности дожития (функции дожития – *S*), т.е. по следующей формуле:

$$LAR_{орг}(g, l, s, D) = \frac{1}{DDREF} \cdot \sum_{a=g}^{a_{max}} EAR(g, a, l, s, D) \cdot S(g, a, l, s),$$

где *DDREF* – коэффициент эффективности дозы и мощности дозы, учитывающий уменьшение риска в случае хрониче-

ческого облучения или облучения в малой дозе; в МКРЗ в Публикации 103 рекомендуется значение **DDREF** брать равное 2; a_{max} обычно выбирается от 90 до 120 лет.

Результатом оценки доз внутреннего облучения в случае индивидуального дозиметрического контроля или группового дозиметрического контроля, как правило, является эффективная доза (**E**). При этом для дальнейшей оценки поглощённых или эквивалентных доз на органы и ткани требуются определённые допущения от распределения поглощённых доз в теле человека, принимая во внимание тот или иной сценарий облучения.

Ниже рассматриваются сценарии облучения, при которых дозы обусловлены, в основном, ингаляционным поступлением соединений урана и дочерних продуктов распада радона в организм человека. В качестве примеров рассмотрены эффективные дозы 2 мЗв и 10 мЗв, при четырёх разных модельных предположениях о распределении эквивалентных доз в органах, в том числе и при небольшом поступлении радионуклидов через желудочно-кишечный тракт. Были выбраны следующие сценарии для расчёта пожизненного атрибутивного риска по органной дозе, **LAR_{орг}**:

- 1) на лёгкие;
- 2) на лёгкие и толстый кишечник;
- 3) на лёгкие и красный костный мозг;
- 4) на лёгкие, толстый кишечник и красный костный мозг.

Для сравнения вычислялась оценка пожизненного избыточного атрибутивного риска с использованием эффективных доз 2 мЗв и 10 мЗв, т.е. для всех злокачественных новообразований (**LAR_{эфф}**). Для выбранных органов и тканей, согласно Рекомендациям МКРЗ 2007 г. [МКРЗ Публикация 103, 2009], тканевой фактор перехода от **H** к **E** равен 0,12, т.е. оценка эквивалентной дозы в органе даётся соотношением $H=E/0,12$. При оценке пожизненных рисков использовались функция дожития и показатели онкологической смертности для российской популяции по данным 2009 г. [Чиссов В.И. и др., 2000-2009].

Результаты и обсуждение

Результаты расчёта для трёх групп по возрасту при облучении *g*: 20-24 года, 40-44 года и 60-64 года представлены ниже в табл. 1.6.1–1.6.6.

Для того чтобы оценить отличие в оценке радиационных рисков, рассчитанных по органной и эффективной дозе, введён коэффициент ***R***, равный отношению пожизненного атрибутивного риска, рассчитанного с помощью органных доз, к риску, рассчитанному с помощью эффективной дозы.

Таблица 1.6.1.

Риск, рассчитанный по органным дозам (суммарно 2 мЗв/0,12=16,7 мЗв), и его отношение к риску, рассчитанному по эффективной дозе (коэффициент R), для различных распределений органных доз (в % от суммарной дозы) при облучении мужчин и женщин в возрастной группе 20-24 года

Лёгкие (%)	Красный костный мозг (%)	Толстый кишечник (%)	Мужчины (20-24 года)		Женщины (20-24 года)	
			LAR _{орг} на 10 тыс.	R=LAR _{орг} /LAR _{эфф}	LAR _{орг} на 10 тыс.	R=LAR _{орг} /LAR _{эфф}
100	0	0	0,849	0,920	1,693	0,881
95	0	5	0,854	0,926	1,637	0,851
90	0	10	0,859	0,931	1,581	0,822
85	0	15	0,864	0,936	1,525	0,793
80	0	20	0,869	0,942	1,469	0,764
95	5	0	0,866	0,939	1,648	0,857
90	10	0	0,891	0,965	1,609	0,837
85	15	0	0,908	0,984	1,564	0,813
80	20	0	0,925	1,002	1,520	0,790
95	2,5	2,5	0,860	0,932	1,643	0,854
90	5	5	0,871	0,944	1,592	0,828
85	7,5	7,5	0,890	0,964	1,547	0,805
80	10	10	0,901	0,976	1,497	0,778

Таблица 1.6.2.

*Риск, рассчитанный по органным дозам
(суммарно 2 мЗв/0,12=16,7 мЗв), и его отношение к риску,
рассчитанному по эффективной дозе (коэффициент R),
для различных распределений органных доз
(в % от суммарной дозы) при облучении мужчин и женщин
в возрастной группе 40-44 года*

Лёгкие (%)	Красный кост- ный мозг (%)	Толстый кишечник (%)	Мужчины (40-44 года)		Женщины (40-44 года)	
			LAR _{орг} на 10 тыс.	R=LAR _{орг} / LAR _{эфф}	LAR _{орг} на 10 тыс.	R=LAR _{орг} / LAR _{эфф}
100	0	0	0,948	1,876	1,704	1,809
95	0	5	0,927	1,834	1,634	1,734
90	0	10	0,906	1,793	1,564	1,659
85	0	15	0,885	1,751	1,493	1,585
80	0	20	0,864	1,709	1,423	1,510
95	5	0	0,957	1,894	1,685	1,788
90	10	0	0,974	1,926	1,674	1,776
85	15	0	0,983	1,945	1,654	1,756
80	20	0	0,992	1,963	1,635	1,735
95	2,5	2,5	0,942	1,864	1,659	1,761
90	5	5	0,936	1,852	1,614	1,713
85	7,5	7,5	0,937	1,855	1,578	1,675
80	10	10	0,931	1,843	1,533	1,627

Как видно из табл. 1.6.1–1.6.6, значения коэффициента **R** близко к 1 в возрастной группе 20-24 года и увеличивается с возрастом: так, в группе 60-64 года риск, рассчитанный по органным дозам, примерно в 4 раза выше риска, рассчитанного по эффективной дозе.

Нужно обратить внимание, что с увеличением вклада в дозу на толстый кишечник и красный костный мозг и снижением вклада в дозу на лёгкие, в возрастной группе 20-24 года среди мужчин наблюдается рост радиационного риска.

Таблица 1.6.3.

Риск, рассчитанный по органным дозам (суммарно 2 мЗв/0,12=16,7 мЗв), и его отношение к риску, рассчитанному по эффективной дозе (коэффициент R), для различных распределений органных доз (в % от суммарной дозы) при облучении мужчин и женщин в возрастной группе 60-64 года

Лёгкие (%)	Красный кост- ный мозг (%)	Толстый кишечник (%)	Мужчины (60-64 года)		Женщины (60-64 года)	
			LAR _{орг} на 10 тыс.	R=LAR _{орг} / LAR _{эфф}	LAR _{орг} на 10 тыс.	R=LAR _{орг} / LAR _{эфф}
100	0	0	0,557	3,921	1,140	4,216
95	0	5	0,537	3,780	1,087	4,022
90	0	10	0,517	3,640	1,035	3,828
85	0	15	0,497	3,500	0,982	3,633
80	0	20	0,477	3,359	0,929	3,439
95	5	0	0,566	3,990	1,107	4,097
90	10	0	0,581	4,093	1,078	3,989
85	15	0	0,591	4,163	1,046	3,870
80	20	0	0,601	4,233	1,014	3,751
95	2,5	2,5	0,552	3,885	1,097	4,060
90	5	5	0,547	3,850	1,055	3,903
85	7,5	7,5	0,546	3,847	1,015	3,757
80	10	10	0,541	3,812	0,973	3,601

В возрастных группах 40-44 года и 60-64 года среди мужчин в сценариях «лёгкие и толстый кишечник» и «лёгкие, красный костный мозг и толстый кишечник» риск заболевания снижается от первого сценария к последующему. Это связано с особенностями зависимости радиационного риска рака разных локализаций от возраста при облучении. По той же причине у женщин во всех трёх рассмотренных сценариях с уменьшением вклада в дозу на лёгкие и увеличением вклада в дозу на толстый кишечник и

Таблица 1.6.4.

Риск, рассчитанный по органным дозам (суммарно $10 \text{ мЗв}/0,12=83,3 \text{ мЗв}$), и его отношение к риску, рассчитанному по эффективной дозе (коэффициент R), для различных распределений органных доз (в % от суммарной дозы) при облучении мужчин и женщин в возрастной группе 20-24 года

Лёгкие (%)	Красный кост- ный мозг (%)	Толстый кишечник (%)	Мужчины (20-24 года)		Женщины (20-24 года)	
			$\text{LAR}_{\text{орг}}$ на 10 тыс.	$R=\text{LAR}_{\text{орг}}/\text{LAR}_{\text{эфф}}$	$\text{LAR}_{\text{орг}}$ на 10 тыс.	$R=\text{LAR}_{\text{орг}}/\text{LAR}_{\text{эфф}}$
100	0	0	4,247	0,920	8,466	0,881
95	0	5	4,272	0,926	8,186	0,851
90	0	10	4,297	0,931	7,905	0,822
85	0	15	4,322	0,936	7,625	0,793
80	0	20	4,346	0,942	7,345	0,764
95	5	0	4,348	0,942	8,253	0,858
90	10	0	4,443	0,962	8,036	0,836
85	15	0	4,547	0,985	7,826	0,814
80	20	0	4,653	1,008	7,617	0,792
95	2,5	2,5	4,310	0,934	8,219	0,855
90	5	5	4,372	0,947	7,973	0,829
85	7,5	7,5	4,436	0,961	7,727	0,804
80	10	10	4,492	0,973	7,476	0,778

красный костный мозг наблюдается снижение суммарного радиационного риска.

В сценарии «лёгкие и красный костный мозг» у мужчин во всех трёх рассмотренных возрастных группах с увеличением вклада в дозу на красный костный мозг и уменьшением вклада на лёгкие, наблюдается рост радиационного риска. У женщин же, как отмечалось выше, в аналогичном сценарии риск снижается.

Более детальный анализ конкретной возрастной группы

Таблица 1.6.5.

*Риск, рассчитанный по органным дозам
(суммарно $10 \text{ мЗв}/0,12=83,3 \text{ мЗв}$), и его отношение к риску,
рассчитанному по эффективной дозе (коэффициент R),
для различных распределений органных доз
(в % от суммарной дозы) при облучении мужчин и женщин
в возрастной группе 40-44 года*

Лёгкие (%)	Красный кост- ный мозг (%)	Толстый кишечник (%)	Мужчины (40-44 года)		Женщины (40-44 года)	
			$\text{LAR}_{\text{орг}}$ на 10 тыс.	$R=\text{LAR}_{\text{орг}}/\text{LAR}_{\text{эфф}}$	$\text{LAR}_{\text{орг}}$ на 10 тыс.	$R=\text{LAR}_{\text{орг}}/\text{LAR}_{\text{эфф}}$
100	0	0	4,741	1,876	8,521	1,809
95	0	5	4,636	1,834	8,170	1,734
90	0	10	4,530	1,793	7,818	1,659
85	0	15	4,424	1,751	7,467	1,585
80	0	20	4,319	1,709	7,116	1,510
95	5	0	4,802	1,900	8,441	1,792
90	10	0	4,857	1,922	8,355	1,773
85	15	0	4,922	1,947	8,279	1,757
80	20	0	4,988	1,974	8,206	1,742
95	2,5	2,5	4,718	1,867	8,305	1,763
90	5	5	4,696	1,858	8,090	1,717
85	7,5	7,5	4,674	1,850	7,875	1,671
80	10	10	4,646	1,838	7,652	1,624

40-44 года показал, что при увеличении вклада в дозу на красный костный мозг пожизненный атрибутивный риск лейкозов растёт как у мужчин, так и у женщин. Очевидно, что при уменьшении вклада в дозу на лёгкие, риск заболеть раком лёгких снижается как у мужчин, так и у женщин. Так как пожизненный атрибутивный риск в сценарии «лёгкие и красный костный мозг» является суммой риска лейкоза и риска рака лёгких, то различие в поведении суммарного риска красного костного мозга и лёгких объясняется тем,

Таблица 1.6.6.

Риск, рассчитанный по органным дозам (суммарно $10 \text{ мЗв}/0,12=83,3 \text{ мЗв}$), и его отношение к риску, рассчитанному по эффективной дозе (коэффициент R), для различных распределений органных доз (в % от суммарной дозы) при облучении мужчин и женщин в возрастной группе 60-64 года

Лёгкие (%)	Красный кост- ный мозг (%)	Толстый кишечник (%)	Мужчины (60-64 года)		Женщины (60-64 года)	
			$\text{LAR}_{\text{орг}}$ на 10 тыс.	$R=\text{LAR}_{\text{орг}}/\text{LAR}_{\text{эфф}}$	$\text{LAR}_{\text{орг}}$ на 10 тыс.	$R=\text{LAR}_{\text{орг}}/\text{LAR}_{\text{эфф}}$
100	0	0	2,783	3,921	5,698	4,216
95	0	5	2,683	3,780	5,435	4,022
90	0	10	2,584	3,640	5,173	3,828
85	0	15	2,484	3,500	4,910	3,633
80	0	20	2,384	3,359	4,647	3,439
95	5	0	2,842	4,004	5,543	4,102
90	10	0	2,898	4,082	5,386	3,986
85	15	0	2,959	4,169	5,233	3,872
80	20	0	3,022	4,258	5,081	3,760
95	2,5	2,5	2,763	3,892	5,489	4,062
90	5	5	2,742	3,864	5,280	3,908
85	7,5	7,5	2,723	3,836	5,072	3,753
80	10	10	2,698	3,802	4,861	3,597

что снижение риска при уменьшении вклада в дозу на лёгкие у мужчин происходит медленнее, чем у женщин, при одинаковом увеличении риска лейкозов.

Заключение

Рассмотрены количественные оценки вероятности возникновения радиационно-индуцированных заболеваний вследствие внутреннего облучения для сценариев годового облучения, при которых поглощённые дозы в органах и тканях определяются, в основном, ингаляционным поступлением радионуклидов.

Показано, что для российской популяции в возрастной группе 20-24 года на момент облучения величина пожизненного атрибутивного риска, рассчитанного по органным дозам (LAR_{ORG}), меняется в зависимости от рассмотренных распределений органных доз с разбросом не более 10 % от его средней величины, а отличие LAR_{ORG} от величины пожизненного атрибутивного риска, формально рассчитанного по эффективной дозе ($LAR_{ЭФФ}$), составляет менее 25 %.

Значения пожизненного атрибутивного риска LAR_{ORG} для возраста при облучении старше 40 лет, в зависимости от рассмотренных распределений органных доз, имеют разброс не более 10 % от его средней величины, в то время как отличия LAR_{ORG} от $LAR_{ЭФФ}$ для этих возрастов составляют не менее 1,5 крат.

Таким образом, при преимущественно ингаляционном поступлении радионуклидов в организм человека оценка пожизненного атрибутивного риска для персонала атомной промышленности России в условиях нормальной эксплуатации может быть выполнена в предположении, что органная доза полностью сосредоточена в органах дыхания. Эффективная доза может дать приблизительную оценку вреда при облучении для персонала моложе 25 лет.

ГЛАВА 2

АРМИР: СИСТЕМА ОЦЕНКИ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ РАДИАЦИОННЫХ РИСКОВ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБЛУЧЕНИЯ

2.1. Программно-информационное обеспечение системы АРМИР

Государственная корпорация (ГК) по использованию атомной энергии «Росатом» совместно с Российской научной комиссией по радиологической защите при РАМН и Научно-производственной компанией «Мединфо» создали информационно-аналитическую систему оценки профессионального риска АРМИР.

Система АРМИР основана на принципах и методах вычисления радиационного риска, рекомендованных ведущими международными организациями (Научным комитетом ООН по действию атомной радиации, Международной комиссией по радиологической защите, МАГАТЭ). В ходе реализации системы АРМИР были разработаны алгоритмы расчета различных мер радиационного риска при многократном облучении, созданы специализированное программное обеспечение и базы данных. Проведены работы по обоснованию применимости математических моделей, разработанных по данным наблюдения за пережившими атомную бомбардировку жителями Японии, к российским условиям. В результате проведения крупномасштабных исследований зависимости «доза–эффект» в российских когортах лиц, подвергшихся радиационному воздействию (участники ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС, персонал предприятий атомной отрасли), получены прямые оценки коэффициентов радиационного риска.

Система оценки профессионального радиационного риска **АРМИР** обеспечивает:

- выполнение требований *Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года* по реализации принципа «социально приемлемого риска» [Основы государственной политики, 2012];

- выполнение требования Международных основных норм безопасности МАГАТЭ о том, что работодатели обеспечивают «...получение всеми работниками адекватной информации о рисках для здоровья, связанных с их профессиональным облучением» [МАГАТЭ, 2011];

- выполнение национальных норм радиационной безопасности, в части, касающейся ограничения на величину индивидуального радиационного риска при нормальных условиях эксплуатации техногенных источников ионизирующего излучения [НРБ-99/2009, 2009];

- информационную поддержку формы ведомственного статистического наблюдения 10-РТБ-5 «Сведения о состоянии радиационной и токсической безопасности в организации»;

- выполнение приказа по ГК «Росатом» от 04.02.2013 г. № 1/101-П «Об утверждении Единой отраслевой социальной политики ГК «Росатом»;

- информирование профессионального сообщества и заинтересованной общественности о существующих радиационных рисках в атомной отрасли через отчет по безопасности, публичный годовой отчет, отраслевые СМИ.

Работы по опытной эксплуатации объектового сегмента системы АРМИР были начаты на ФГУП «ПО «Маяк» в 2006 г. В настоящее время система АРМИР охватывает более 50 ядерно- и радиационно-опасных организаций ГК «Росатом». 27 организаций, вместе со своими филиалами, для работы с системой АРМИР используют специализированный интернет-сайт «АРМИР+». Службы радиационной безопасности 23-х организаций используют установленное в организации автоматизиро-

ванное рабочее место АРМИР версии 5.0.

Программное обеспечение отраслевого сегмента системы АРМИР функционирует в составе комплекса технических средств (рис. 2.1.1), включающего:

- сервер баз данных;
- сервер интернет-служб;
- поддерживающие серверы;
- оборудование хранения данных;
- коммутационное оборудование и каналы связи;
- источники бесперебойного питания;
- вспомогательное оборудование.

Готовность комплекса технических средств отраслевого уровня системы АРМИР обеспечивается с помощью взаимного резервирования серверов (аппаратного и программного) и оборудования хранения данных, применения избыточных аппаратных компонентов серверов и оборудования хранения данных (массивов жёстких дисков и блоков питания), обеспечения бесперебойного питания и охлаждения оборудования, резервирования каналов связи.

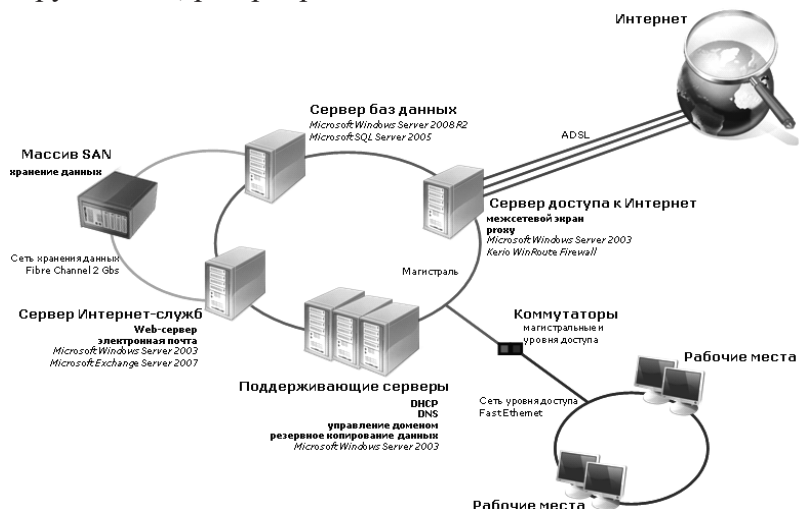


Рис. 2.1.1. Основные элементы комплекса технических средств, в составе которого функционирует программное обеспечение отраслевого уровня системы АРМИР

Управление системой АРМИР сосредоточено в Департаменте ядерной и радиационной безопасности ГК. Важнейшей функцией такого управления является обеспечение качества и актуальности входных данных. Входные данные содержатся в базах данных объектового уровня. Базы данных системы АРМИР объектового уровня содержат персональную информацию (идентификатор, фамилия, имя, отчество, пол, дата рождения) и величины ежегодных доз облучения персонала, состоящего на индивидуальном дозиметрическом контроле. Объектовая база данных состоит из пользовательских и служебных таблиц. Схема данных приведена на рис. 2.1.2.

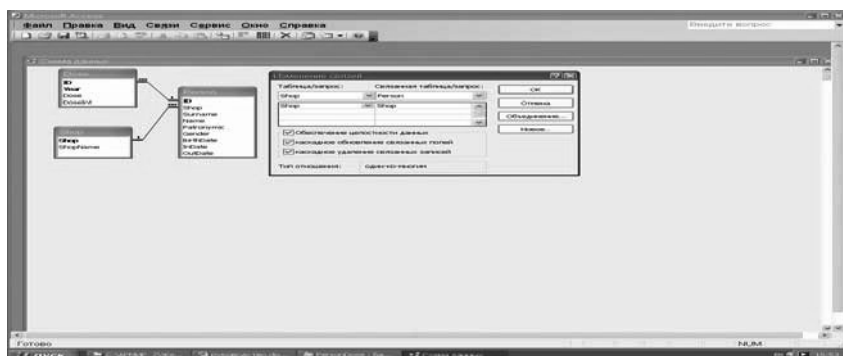


Рис. 2.1.2. Логическая схема данных объектовой базы данных системы АРМИР

Согласно регламентным документам организации, у которых установлено автоматизированное рабочее место по оценке индивидуальных рисков АРМИР-5, направляют обезличенные индивидуальные данные о годовых дозах облучения в базу данных отраслевого сегмента. Организации, которые используют интернет-сайт «АРМИР+», загружают обезличенные данные об индивидуальных дозовых нагрузках на сервер в виде электронных таблиц, которые затем конвертируются в формат базы данных отраслевого сегмента.

Вся информация, поступающая в базу данных отраслевого сегмента, проходит контроль качества данных:

– оперативный контроль при выполнении пользователем интернет-сайта «АРМИР+» расчетов индивидуальных радиационных рисков;

– углубленный контроль при объединении информации из объектовых баз данных в базу данных отраслевого уровня.

Оперативный контроль состоит в проверке соответствия таблицы исходных данных требованиям Инструкции по заполнению файла исходных данных (Инструкция размещена на сайте «АРМИР+»). В частности, выполняется проверка на наличие возможных ошибок оператора ввода данных (экстремальные значения годовых доз облучения, неверная кодировка пола работника, допустимость возраста при облучении и т.д., рис. 2.1.3). Для записей, не прошедших входной оперативный контроль, приводится причина ошибки в столбце «Примечание».

ID	Имя	Пол	Год рождения	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Риск	Примечание
1	10001	м	1995	26.7	36.5	23.29	0	0.74	1.84	0.91	1.31	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	Ошибки: должно быть целое число в дробной части
2	10002	в	1995	0	0	0	0	1.12	1.45	0.5	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	Ошибки: неправильно указан год
3	10003	м	1995	0	0	0	0	0.74	1.84	0.91	1.31	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	Ошибки: неправильно указан год рождения
4	10004	м	1995	0	0	0	0	0.74	1.84	0.91	1.31	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	Ошибки: должно быть целое число и дробная часть
5	10005	м	1995	0	0	0	0	0.74	1.84	0.91	1.31	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	Ошибки: должно быть целое число и дробная часть
6	10006	м	1995	0	0	0	0	0.74	1.84	0.91	1.31	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	Ошибки: должно быть неотрицательное значение
7	10007	м	1995	0	0	0	0	0.74	1.84	0.91	1.31	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	Ошибки: должно быть неотрицательное значение
8	10008	м	1995	0	0	0	0	1.12	1.45	0.5	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	Ошибки: должно быть неотрицательное значение
9	10009	м	1995	0	0	0	0	0.74	1.84	0.91	1.31	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	Ошибки: должно быть неотрицательное значение
10	10010	м	1995	0	0	0	0	0.74	1.84	0.91	1.31	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	Ошибки: должно быть неотрицательное значение
11	10011	м	1995	0	0	0	0	0.74	1.84	0.91	1.31	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	Ошибки: должно быть неотрицательное значение
12	10012	м	1995	0	0	0	0	0.74	1.84	0.91	1.31	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	Ошибки: возраст не может быть нулевым
13	10013	м	1995	0	0	0	0	0.74	1.84	0.91	1.31	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	Ошибки: возраст не может быть нулевым
14	10014	м	1995	0	0	0	0	0.74	1.84	0.91	1.31	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	Ошибки: возраст не может быть нулевым
15	10015	м	1995	0	0	0	0	0.74	1.84	0.91	1.31	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	Ошибки: возраст не может быть нулевым
16	10016	м	1995	0	0	0	0	0.74	1.84	0.91	1.31	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	Ошибки: возраст не может быть нулевым
17	10017	м	1995	0	0	0	0	0.74	1.84	0.91	1.31	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	Ошибки: возраст не может быть нулевым
18	10018	м	1995	0	0	0	0	0.74	1.84	0.91	1.31	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	Ошибки: возраст не может быть нулевым
19	10019	м	1995	0	0	0	0	0.74	1.84	0.91	1.31	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	Ошибки: возраст не может быть нулевым
20	10020	м	1995	0	0	0	0	0.74	1.84	0.91	1.31	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	Ошибки: возраст не может быть нулевым

Рис. 2.1.3. Пример исходных данных, не прошедших оперативный контроль

С целью обратить внимание оператора ввода данных на возможную ошибку в значениях годовых доз облучения выдается предупреждение для записей, в которых доза облучения за отчетный год превышает 20 мЗв или 100 мЗв за последние 5 лет, или 1 Зв за весь период работы. Отчет о результатах расчета индивидуальных радиационных рисков, включая причины ошибок и предупреждения, пользователь интернет-сайта получает в режиме онлайн.

Цель углубленного контроля состоит в оценке полноты и качества данных. Работы по углубленному контролю проводятся с привлечением экспертов по статистическому анализу.

Углубленный контроль заключается в основном в оценке параметров распределений различных характеристик исходных данных (половозрастное распределение, распределение накопленной за различные периоды работы дозы, распределение по стажу работы и др.). Сравнение с аналогичными параметрами, полученными по данным за предыдущий отчетный год, позволяет выявить особенности проверяемых данных. В течение месяца после получения данных на предприятие может быть направлено информационное сообщение по результатам углубленного контроля о выявленных проблемах в исходных данных. Углубленный контроль данных проводится для организаций, численность персонала на ИДК в которых превысила 500 человек.

Так, эмпирические функции распределения дозы, полученной работниками ФГУП «ПО «Маяк» в 2010 отчетном году и 2011 отчетном году, различаются существенно. Гистограммы этих характеристик приведены на рис. 2.1.4. Deskриптивные статистики даны в табл. 2.1.1.

Распределения существенно отличаются от нормального распределения и ближе к логнормальному закону. Статистика непараметрического критерия Колмогорова-Смирнова

$$\sqrt{\frac{nm}{n+m}} D_{n,m},$$

где n и m – размеры выборок, $D_{n,m}$ – максимум модуля разности сравниваемых эмпирических функций распределения, приближенно равна 6,16, что значительно превышает критическое значение 1,36 (при уровне $\alpha=0,05$). Следовательно, нулевая гипотеза о равенстве двух эмпирических функций распределения отвергается.

Таблица 2.1.1.

Дескриптивные статистики эмпирических распределений дозы, полученной работниками ФГУП «ПО «Маяк» в 2010 и 2011 отчетных годах

	2011 год	2010 год
Среднее геометрическое	1,83	1,37
Среднее	2,55	2,29
Стандартная ошибка	0,03	0,02
Медиана	1,99	1,69
Мода	0,26	0,04
Стандартное отклонение	2,16	2,21
Дисперсия выборки	4,70	4,91
Эксцесс	6,71	8,92
Асимметричность	2,16	2,42
Интервал	17,22	23,26
Минимум	0,04	0,02
Максимум	17,26	23,28
Сумма	18962,56	20475,37

В целом можно сказать, что дозовая нагрузка на работников ФГУП «ПО «Маяк» возросла, хотя коллективная доза за 2011 меньше, чем за 2010 г. (строка «Сумма» табл. 2.1.1). Такое снижение коллективной дозы обусловлено уменьшением на 16 % численности персонала группы А. При этом возрастные распределения за 2010 и 2011 гг. близки (статистика непараметрического критерия Колмогорова-Смирнова равна 1,34, дескриптивные статистики даны в табл. 2.1.2).

Таблица 2.1.2.

*Дескриптивные статистики эмпирических распределений
возраста работников ФГУП «ПО «Маяк»
в 2010 и 2011 отчетных годах*

	2011 год	2010 год
Среднее геометрическое	38,90	39,17
Среднее	40,53	40,88
Стандартная ошибка	0,13	0,12
Медиана	41	42
Мода	48	47
Стандартное отклонение	11,15	11,43
Дисперсия выборки	124,47	130,68
Эксцесс	-0,97	-0,97
Асимметричность	-0,01	-0,03
Интервал	63	61
Минимум	18	19
Максимум	81	80

Возрастные распределения отличаются от нормального распределения и имеют несколько пиков (рис. 2.1.5).

Таким образом, углубленный контроль не выявил проблем в качестве и полноте исходных данных ИДК ФГУП «ПО «Маяк».

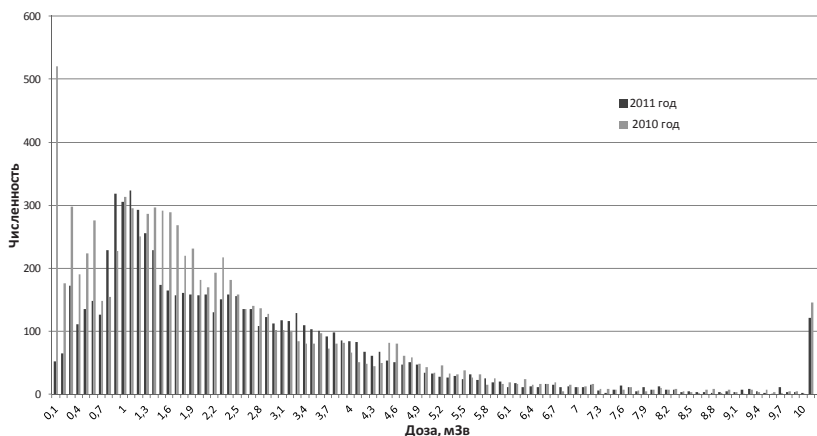


Рис. 2.1.4. Гистограммы дозы, полученной работниками ФГУП «ПО «Маяк» в 2010 и 2011 отчетных годах

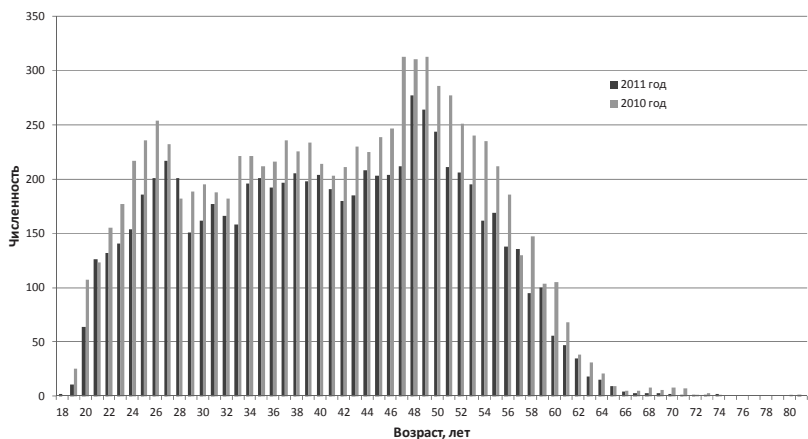


Рис. 2.1.5. Возрастные гистограммы работников ФГУП «ПО «Маяк» в 2010 и 2011 отчетных годах

После объединения объектовой информации база данных отраслевого сегмента системы АРМИР содержит 697 689 записей о годовых дозах облучения персонала, состоящего на ИДК в 2012 году (табл. 2.1.3).

Таблица 2.1.3.

Характеристики базы данных отраслевого сегмента системы АРМИР

Наименование организации	Число записей о годовых дозах	Минимальный год ИДК	Число лиц с дозой более 0 в отчетном году
ОАО «Концерн Росэнергоатом»			
ОАО «ЭНИЦ»	5	2010	2
Балаковская АЭС	10809	1995	2113
Белоярская АЭС	24109	1964	1311
Билибинская АЭС	2792	2005	472
Ростовская АЭС	5420	2001	1058
Калининская АЭС	12684	1984	2580
Кольская АЭС	13156	1973	1405

Продолжение Таблицы

Курская АЭС	49449	1977	3164
Ленинградская АЭС	51482	1974	3723
Нововоронежская АЭС	18431	1999	1945
Смоленская АЭС	45879	1981	2947
ОАО «Атомэнергоремонт»	47745	1968	4840
ОАО «ТВЭЛ»			
ОАО «СХК»	34955	1961	3203
ОАО «АЭХК»	3678	1979	349
ОАО «МСЗ»	21222	1966	1429
ОАО «НЗХК»	3928	1973	308
ОАО «УЭХК»	6723	1973	731
ОАО «ПО «Электрохимический завод»	17492	1997	2073
ЗАО «ОКБ-Нижний Новгород»	309	2000	34
ЗАО «Центротех СПб»	785	2004	101
ОАО «ЧМЗ»	16234	1969	1732
Ядерный оружейный комплекс (ЯОК) Госкорпорации «Росатом»			
ФГУП «ПО «Маяк»	99829	1953	7642
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»	9054	1963	1198
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ»	22883	1962	1619
ФГУП «ПСЗ»	5458	1979	851
ФГУП УЭМЗ	238	2002	36
ФГУП «Комбинат «Электрохимприбор»	10055	1966	1429
ФГУП «НИТИ им. А.П.Александрова»	12440	1971	1083
ФГУП «НИИП»	2183	1968	131
ФГУП АТЦ СПб	413	1999	130
ФГУП «Атомфлот»	5719	1960	403
ОАО «Атомредметзолото»			
ЗАО «Далур»	1843	2000	257
ОАО «ППХХО»	22631	2001	3358
ОАО «ВНИПИпромтехнологии»	118	1996	11
Комплекс ядерной и радиационной безопасности (ЯРБ) Госкорпорации «Росатом»			
ФГУП «ГХК»	40962	1962	2613
ФГУП «РосРАО»	1387	1969	93
Блок по управлению инновациями Госкорпорации «Росатом»			
ОАО «ИРМ»	5584	1967	353
ОАО «ГНЦ НИИАР»	32266	1972	2400
ФГУП «ГНЦ РФ – ФЭИ»	13723	1962	642
ОАО «ВНИИХТ»	1612	2001	231
ОАО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова»	1313	1966	85

Продолжение Таблицы

ОАО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова»	3852	1964	275
ФГУП «ГНЦ ИФВЭ»	12944	1967	564
ОАО «Атомэнергопроект» (капитальное строительство)			
ОАО «НИКИМТ-Атомстрой»	405	1974	23
ОАО «Атомэнергомаш»			
ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»	105	1995	13
ОАО «МЗ «ЗиО-Подольск»	1312	1968	111
ОАО «ОКБМ Африкантов»	1162	1963	106
ОАО Петрозаводскмаш	157	1987	44
Прочие предприятия Госкорпорации «Росатом»			
ОАО «ПЗ «Сигнал»	302	1972	31
ОАО «СПб «Изотоп»	296	1986	33
ОАО «Пятигорский завод „Импульс“»	156	1991	19

Всего в базу данных системы АРМИР отраслевого уровня была внесена информация о 61 304 работниках, что составляет 89,6 % от числа контролируемых лиц [Отчет по безопасности, 2013].

2.2. Профессиональное облучение и радиационные риски персонала, состоящего на ИДК

Компьютерная система АРМИР в настоящее время обеспечивает в динамике оценку индивидуальных радиационных рисков почти 90 % персонала ГК «Росатом», состоящего на ИДК. На протяжении нескольких лет средний по отрасли риск не превышает величины 0,00008. Абсолютное большинство и мужчин и женщин работают в условиях тривиального радиационного риска. Современная лучевая нагрузка на персонал ГК «Росатом» соответствует допустимым уровням риска для здоровья работников.

Доля работников, входящих в группу повышенного риска, не превышает 1,5 % от общей численности персонала, включенного в систему АРМИР. Группу повышенного риска составляют преимущественно ветераны отрасли: средний возраст персонала из группы повышенного риска –

60 лет, средний стаж – в 3,5 раза больше, а средняя накопленная доза – в 12 раз больше, чем у всего персонала, состоящего на ИДК.

Сводные данные по профессиональному облучению персонала, включенного в систему АРМИР, приведены в табл. 2.2.1 и на рис. 2.2.1–2.2.5. Данные приведены для групп предприятий.

Таблица 2.2.1.

Основные характеристики профессионального облучения по группам предприятий

Группа предприятий	Численность	Средний возраст, лет	Средняя накопленная доза, мЗв	Средняя доза за год, мЗв	Средний стаж на ИДК, лет
ОАО «Концерн Росэнергоатом»	25560	42,2	51,30	1,70	11,0
ОАО «ТВЭЛ»	9960	43,2	20,60	1,11	10,6
ЯОК Госкорпорации «Росатом»	14522	42,6	33,20	1,92	11,6
ОАО «Атомредметзолото»	3626	37,2	35,45	3,58	6,7
Комплекс ЯРБ	2706	44,6	38,76	0,79	15,7
Блок по управлению инновациями	4550	47,7	44,57	2,12	15,7
ОАО «Атомэнергопроект»	23	52,4	52,82	1,51	17,6
ОАО «Атомэнергомаш»	274	40,0	24,32	1,20	10,0
Прочие предприятия	83	50,0	13,98	1,04	9,1
Итого по ГК «Росатом»	61304	42,7	39,86	1,75	11,4

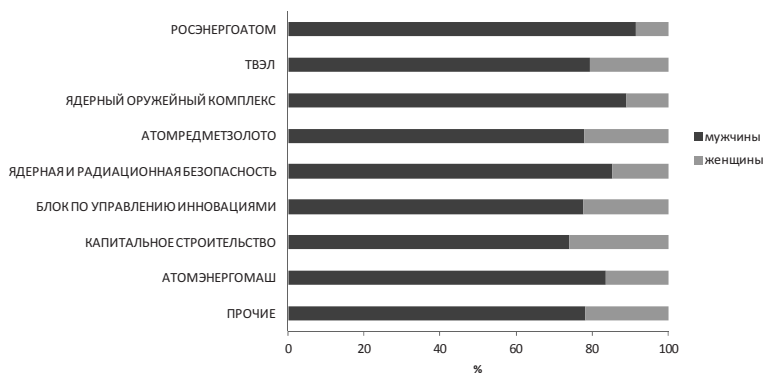


Рис. 2.2.1. Доля (%) мужчин и женщин среди персонала групп предприятий

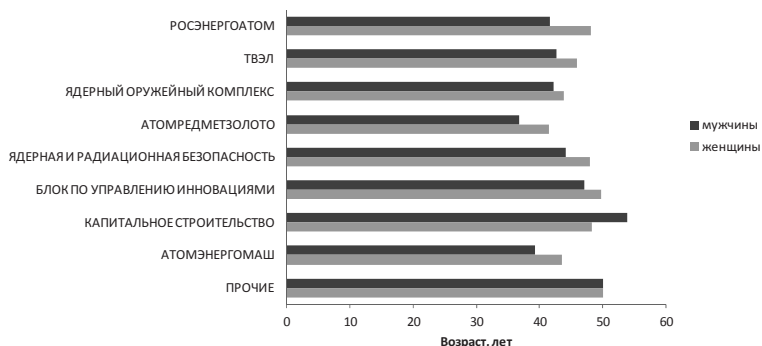


Рис. 2.2.2. Средний возраст персонала групп предприятий

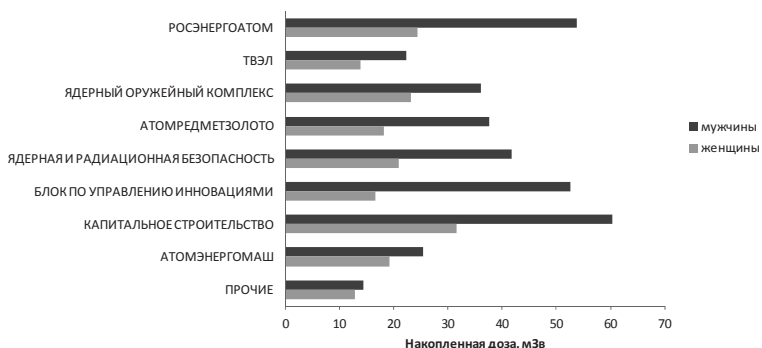


Рис. 2.2.3. Средняя накопленная доза персонала групп предприятий

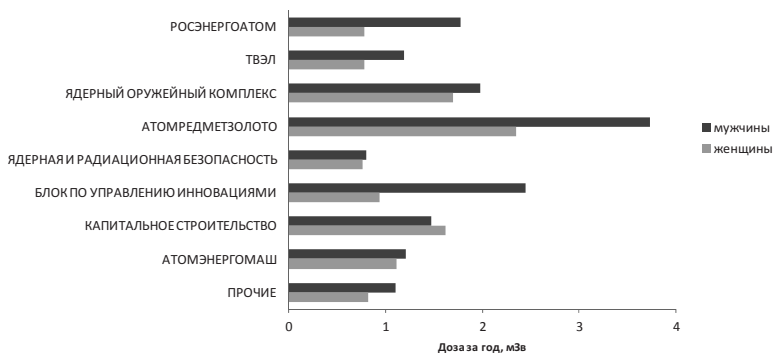


Рис. 2.2.4. Средняя доза за год персонала групп предприятий

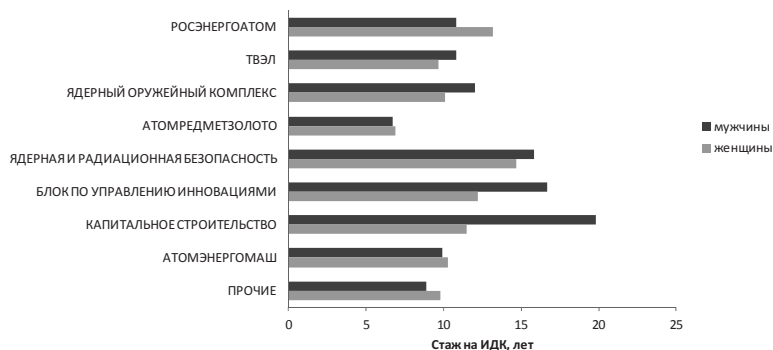


Рис. 2.2.5. Средний стаж персонала групп предприятий

Среди работников, включенных в систему АРМИР, доля мужчин увеличилась на 1 % и составила 84,5 %. Наибольшая доля мужчин зафиксирована в группе предприятий ОАО «Концерн Росэнергоатом» («РОСЭНЕРГОАТОМ») – 91 %, наименьшая – 74 % – в группе предприятий ОАО «Атомэнергoproект» («КАПИТАЛЬНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО»). Отметим, что группа предприятий «КАПИТАЛЬНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО» самая малочисленная: всего 23 человека.

Средний возраст персонала составил 42 года. Женщины всюду, за исключением группы «КАПИТАЛЬНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО», в среднем старше, чем мужчины (42 года – у мужчин, 46 лет – у женщин).

Средняя накопленная доза персонала увеличилась на 2 мЗв и составляет 40 мЗв (43 мЗв – у мужчин, 20 мЗв – у женщин). Наибольшая средняя накопленная доза зафиксирована в группах предприятий «КАПИТАЛЬНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО» – 52 мЗв и «РОСЭНЕРГАОАТОМ» – 51 мЗв. Накопленная дозовая нагрузка на мужчин существенно больше, чем на женщин. Наибольшая средняя накопленная доза у мужчин зафиксирована в группе предприятий «КАПИТАЛЬНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО» – 60 мЗв, наименьшая средняя накопленная доза у мужчин в группе предприятий «ПРОЧИЕ» – 14 мЗв.

Средняя доза за год снизилась на 0,2 мЗв и составляет 1,7 мЗв (1,9 мЗв – у мужчин, 1,2 мЗв – у женщин). Наибольшая средняя доза за год зафиксирована в группе предприятий ОАО «Атомредметзолото» («АТОМРЕДМЕТЗОЛОТО») – 3,7 мЗв. За исключением группы предприятий «КАПИТАЛЬНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО» дозовая нагрузка в отчетном году на мужчин существенно больше, чем на женщин. Наибольшая средняя доза за отчетный год у мужчин зафиксирована в группе предприятий «АТОМРЕДМЕТЗОЛОТО» – 3,7 мЗв, наименьшая средняя доза – у мужчин в группе предприятий комплекса «ЯДЕРНАЯ И РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ» – 0,8 мЗв.

Женщины работают с источниками ионизирующего излучения в среднем примерно столько же, сколько мужчины – около 11 лет. Наибольший средний стаж у мужчин – 20 лет – в группе предприятий «КАПИТАЛЬНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО», наименьший – 7 лет – в группе предприятий «АТОМРЕДМЕТЗОЛОТО».

Согласно Нормам радиационной безопасности (НРБ-99/2009) радиационный риск – это «...вероятность возникновения у человека или у его потомства какого-либо вредного эффекта в результате облучения» [НРБ-99/2009, 2009]. Далее под радиационным риском будем понимать вероятность возникновения у работника злокачественного новообразования.

Вся информация из базы данных отраслевого сегмента системы АРМИР была использована для определения профессионального персонального риска работников, находившихся на индивидуальном дозиметрическом контроле в отчетном году (рис. 2.2.6).

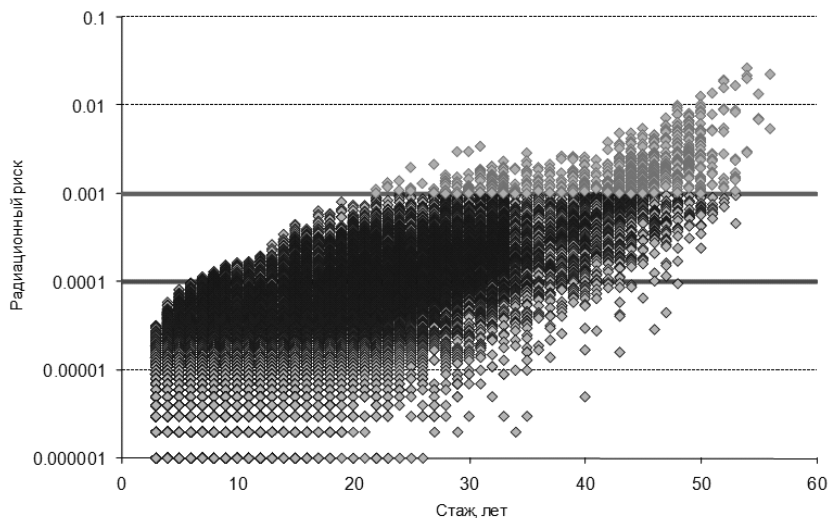


Рис. 2.2.6. Индивидуальные радиационные риски персонала в зависимости от стажа работы с техногенными источниками ионизирующей радиации

Средний по отрасли радиационный риск равен 0,000076 (табл. 2.2.2), что незначительно превышает уровень прошлого года, но меньше, чем показатель двухлетней давности. Максимальные величины рисков зафиксированы в группах предприятий ОАО «ТВЭЛ» и «ЯДЕРНЫЙ ОРУЖЕЙНЫЙ КОМПЛЕКС», причем в группе предприятий «ЯДЕРНЫЙ ОРУЖЕЙНЫЙ КОМПЛЕКС» максимальное значение риска снизилось по сравнению с прошлым годом.

Таблица 2.2.2.

Средние и максимальные радиационные риски по группам предприятий

Группа предприятий	Средний риск	Максимальный риск
ОАО «Концерн Росэнергоатом»	1,0E-04	6,1E-03
ОАО «ТВЭЛ»	3,4E-05	6,9E-03
ЯОК Госкорпорации «Росатом»	5,9E-05	6,7E-03
ОАО «Атомредметзолото»	2,1E-05	2,2E-04
Комплекс ЯРБ	1,0E-04	4,4E-03
Блок по управлению инновациями	1,1E-04	3,2E-03
ОАО «Атомэнергопроект»	1,6E-04	1,3E-03
ОАО «Атомэнергомаш»	7,2E-05	1,6E-03
Прочие предприятия	1,4E-05	2,9E-04
<i>Итого по ГК «Росатом»</i>	7,6E-05	6,9E-03

Абсолютное большинство и мужчин и женщин работает в условиях тривиального радиационного риска. Группу повышенного риска составили работники, у которых радиационный риск более 10^{-3} . В табл. 2.2.3 приведена относительная численность группы повышенного риска в зависимости от пола работников (мужчины, женщины).

Таблица 2.2.3.

Относительная численность группы повышенного риска по группам предприятий

Группа предприятий	Относительная численность, %		
	мужчины	женщины	оба пола
ОАО «Концерн Росэнергоатом»	2,02	0,14	1,86
ОАО «ТВЭЛ»	0,47	0,00	0,37
ЯОК Госкорпорации «Росатом»	0,80	0,28	0,69
ОАО «Атомредметзолото»	0,00	0,00	0,00
Комплекс ЯРБ	2,68	0,25	2,33
Блок по управлению инновациями	2,29	0,40	1,87
ОАО «Атомэнергопроект»	5,88	0,00	4,35
ОАО «Атомэнергомаш»	3,06	0,00	2,55
Прочие предприятия	0,00	0,00	0,00
<i>Итого по ГК «Росатом»</i>	1,45	0,18	1,25

В группе предприятий ОАО «Атомэнергопроект» («КАПИТАЛЬНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО») – самая большая относительная численность группы высокого риска, хотя в её состав входит только один работник. В целом по ГК «Росатом» относительное количество лиц с повышенным риском находится на уровне двухлетней давности.

В табл. 2.2.4 приведены данные по дозовым нагрузкам, стажу на ИДК и возрасту работников, входящих в группу повышенного риска по группам предприятий ГК «Росатом».

Таблица 2.2.4.

Характеристики персонала, входящего в группу повышенного риска

Группа предприятий	Средний возраст, лет	Средняя за год доза, мЗв	Средняя накопленная доза, мЗв	Средний стаж на ИДК, лет
ОАО «Концерн Росэнергоатом»	58,2	3,9	508,7	33,6
ОАО «ТВЭЛ»	64,9	1,6	321,4	34,8
ЯОК Госкорпорации «Росатом»	62,9	3,5	368,5	40,7
ОАО «Атомредметзолото»	-	-	-	-
Комплекс ЯРБ	63,0	0,7	361,5	40,8
Блок по управлению инновациями	64,1	4,5	348,2	39,1
ОАО «Атомэнергопроект»	64,0	7,6	403,6	39
ОАО «Атомэнергомаш»	69,7	1,1	250,8	46,3
Прочие предприятия	-	-	-	-
<i>Итого по ГК «Росатом»</i>	60,3	3,5	449,2	35,9

Основные характеристики персонала, входящего в группу повышенного риска, в несколько раз больше, чем в целом по персоналу, включенному в систему АРМИР.

Средний возраст работников из группы повышенного риска составил 60,3 года (64 года – у женщин). Средний возраст персонала из группы повышенного риска примерно в 1,5 больше, чем средний возраст всего персонала, состоящего на ИДК.

Средняя накопленная доза облучения работников из

группы повышенного риска – 449 мЗв (278 мЗв – у женщин), что больше почти в 11 раз, чем средняя накопленная доза всего персонала, состоящего на ИДК.

Средняя доза, полученная работниками из группы повышенного риска в отчетном году, – 3,5 мЗв (2,7 мЗв – у женщин). Средняя доза, полученная персоналом из группы повышенного риска в отчетном году, в 2 раза больше, чем средняя доза по отрасли.

Средний стаж работы с источниками ионизирующего излучения в группе повышенного риска – 36 лет (41 год – у женщин). Это более чем в 3 раза больше, чем средний стаж всего персонала, включенного в систему АРМИР.

2.3. Оценка радиационных рисков при планируемом повышенном облучении

Согласно [НРБ-99/2009, 2009] «...планируемое повышенное облучение допускается для мужчин, как правило, старше 30 лет лишь при их добровольном письменном согласии, после информирования о возможных дозах облучения **и риске для здоровья**». Выполним оценку рисков для здоровья при планируемом повышенном облучении на примере персонала предприятий, входящих в ядерный оружейный комплекс (ЯОК) ГК «Росатом». В качестве мер риска будем использовать пожизненный атрибутивный риск *LAR* (*Lifetime Attributable Risk*) и долю пожизненного атрибутивного риска *LARF* (*Lifetime Attributable Risk Fraction*).

Пожизненный атрибутивный риск характеризует количество избыточных над фоновым числом раковых заболеваний, которые могут произойти в течение последующей жизни после облучения группы лиц, у которых одинаковы модифицирующие риск факторы (пол, возраст при облучении и др.). Для индивидуума пожизненный атрибутивный риск можно понимать как вероятность возникновения у него онкологического заболевания, вызванного радиационным облучением.

$$LAR = \frac{1}{DDREF} \cdot \sum_{a=e}^{a_{max}} [S(e, a, l, s) \cdot EAR(a, l, s, \{D_g\})].$$

Здесь $DDREF$ – коэффициент эффективности дозы и мощности дозы, учитывающий уменьшение риска в случае хронического облучения или облучения в малой дозе; a – достигнутый возраст; e – текущий возраст человека, в котором он жив и не болен раком локализации l ; $S()$ – функция здорового дожития; a_{max} – максимальный возраст дожития; s – пол; EAR – избыточный абсолютный риск заболеваемости раком после многократного облучения; D_g – доза облучения в возрасте g .

При вычислении функции здорового дожития должны учитываться показатели смертности от всех причин плюс показатели заболеваемости злокачественными новообразованиями, за вычетом смертности от злокачественных новообразований:

$$S(e, a, l, s) = \exp \left[-10^{-5} \cdot \sum_{k=e}^{a-1} \lambda_0^{totmort}(k, s) + \lambda_0^{inc}(k, l, s) - \lambda_0^{mort}(k, l, s) \right],$$

$$a > e$$

где $\lambda_0^{totmort}(a, s)$ – количество смертей от всех причин в возрасте от a до $a+1$ на 100 тыс. человек в год; $\lambda_0^{mort}(a, l, s)$ – количество смертей от рака локализации l в возрасте от a до $a+1$ на 100 тыс. человек в год; $\lambda_0^{inc}(a, l, s)$ – количество случаев заболевания раком локализации l в возрасте от a до $a+1$ на 100 тыс. человек в год.

Для вычисления доли пожизненного атрибутивного риска $LARF$ будем использовать выражение:

$$LARF = \frac{LAR}{LAR + LBR(e, l, s)} \cdot 100\%.$$

Здесь LBR – величина пожизненного **фонового** риска заболеваемости раком локализации l , рассчитанного от возраста e . Эта величина показывает ожидаемое число раковых заболеваний, которые могут произойти в течение всей оставшейся жизни у группы лиц, начиная с возраста e , в случае

отсутствия облучения этой группы. Для индивидуума пожизненный фоновый риск можно понимать как вероятность возникновения у него в течение предстоящей жизни онкологического заболевания, не связанного с радиационным воздействием:

$$LBR = 10^{-5} \cdot \sum_{a=e}^{a_{\max}} \lambda_0^{inc}(a, l, s) \cdot S(e, a, l, s).$$

Общая численность персонала группы А предприятий ЯОК в 2011 году составляла 13 144 человека. Из них 26 % – работники, которые могут быть допущены к планируемому повышенному облучению (мужчины старше 30-ти лет [НРБ-99/2009, 2009]). Распределение по стажу численности персонала, который может быть допущен к планируемому повышенному облучению, приведено в табл. 2.3.1.

Расчёт пожизненных атрибутивных рисков при планируемом повышенном облучении для приведённых в этих таблицах групп персонала зависит от средней накопленной дозы в группе и от среднего достигнутого возраста в группе (табл. 2.3.2 и 2.3.3). Средний достигнутый возраст персонала составил 49 лет, а средняя индивидуальная накопленная доза – 34,2 мЗв. Наибольшая из средних накопленных доз превысила 300 мЗв (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», для стажа на ИДК более 40 лет).

При вычислении рисков для персонала предприятий ЯОК доза облучения из табл. 2.3.3 равномерно распределялась на весь средний стаж работы персонала. В сформированную таким образом дозовую историю облучения добавлялось острое облучение дозой 200 мЗв в последний год работы. Текущим возрастом и одновременно последним возрастом облучения считался средний возраст из табл. 2.3.2. Риски вычислялись отдельно для всех солидных раков и лейкозов. Пожизненный атрибутивный риск вычислялся без учёта *DDREF*.

Результаты проведённых вычислений представлены в табл. 2.3.4–2.3.11.

Таблица 2.3.1.

Число лиц, допущенных к планируемому повышенному облучению, в зависимости от стажа и предприятия ЯОК

Предприятие	Стаж на ИДК (лет)									
	Все	(0, 5]	(5, 10]	(10, 15]	(15, 20]	(20, 25]	(25, 30]	(30, 35]	(35, 40]	40+
ФГУП «ВНИИА»	9	0	2	2	1	0	0	0	0	4
ФГУП «Комбинат «ЭХП»	798	260	281	207	18	21	7	4	0	0
ФГУП «НИИП»	113	19	16	16	8	10	5	11	13	15
ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»	789	240	91	69	231	131	24	3	0	0
ФГУП «ПО «Маяк»	4043	602	881	844	541	371	366	239	154	45
ФГУП «ПСЗ»	373	115	139	81	18	12	4	4	0	0
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина»	773	367	188	89	40	68	11	5	3	2
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»	754	397	193	65	27	35	11	12	10	4
ФГУП «УЭМЗ»	23	11	12	0	0	0	0	0	0	0
Общий итог	7675	2011	1 803	1 373	884	648	428	278	180	70

Таблица 2.3.2.

Средний возраст (лет) лиц, допущенных к планируемому повышенному облучению, в зависимости от стажа и предприятия ЯОК

Предприятие	Стаж на ИДК (лет)									
	Все	(0, 5]	(5, 10]	(10, 15]	(15, 20]	(20, 25]	(25, 30]	(30, 35]	(35, 40]	40+
ФГУП «ВНИИА»	53		31	52	42					68
ФГУП «Комбинат «ЭХП»	43	42	42	44	50	52	52	56		
ФГУП «НИИП»	56	50	52	44	57	58	62	61	65	68
ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»	50	45	45	48	52	61	62	64		
ФГУП «ПО «Маяк»	44	43	42	41	42	47	50	54	56	62
ФГУП «ПСЗ»	44	42	43	45	44	49	51	51		
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина»	45	43	44	45	46	50	55	61	62	75
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»	46	45	45	48	53	52	56	62	63	74
ФГУП «УЭМЗ»	56	56	57							
Общий итог	49	46	45	46	48	53	55	58	62	69

Таблица 2.3.3.

Средняя накопленная доза (мЗв) лиц, допущенных к планируемому повышенному облучению, в зависимости от стажа и предприятия ЯОК.

Предприятие	Стаж на ИДК (лет)									
	Все	(0, 5]	(5, 10]	(10, 15]	(15, 20]	(20, 25]	(25, 30]	(30, 35]	(35, 40]	40+
ФГУП «ВНИИА»	96,5		27,0	54,0	54,0					163,2
ФГУП «Комбинат «ЭХП»	23,0	3,7	16,2	29,8	83,8	137,2	173,4	269,3		
ФГУП «НИИП»	46,8	3,1	8,6	14,8	27,8	42,8	57,0	62,5	85,1	141,8
ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»	24,8	4,9	11,5	22,3	33,0	48,2	68,0	92,7		
ФГУП «ПО «Маяк»	61,5	5,2	22,8	39,6	63,7	95,5	122,6	153,4	188,3	259,5
ФГУП «ПСЗ»	25,8	3,8	13,2	38,0	79,2	106,8	151,0	239,8		
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина»	13,3	2,8	8,0	18,9	28,6	42,5	52,8	121,5	143,4	206,9
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»	12,8	1,9	7,2	19,7	25,6	47,0	44,7	79,3	107,8	345,8
ФГУП «УЭМЗ»	3,4	1,6	5,1							
Общий итог	34,2	3,4	13,3	29,6	49,5	74,3	95,7	145,5	131,1	223,4

Таблица 2.3.4.

Средний текущий пожизненный атрибутивный риск заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями: LAR на 10000 человек, для различных групп персонала по стажу на ИДК в 2011 г.

Предприятие	Стаж на ИДК (лет)								
	(0, 5]	(5, 10]	(10, 15]	(15, 20]	(20, 25]	(25, 30]	(30, 35]	(35, 40]	40+
ФГУП «ВНИИА»		22,00	25,37	38,74					63,35
ФГУП «Комбинат «ЭХП»	1,99	9,65	18,56	46,99	78,13	106,68	154,87		
ФГУП "НИИП"	1,13	3,46	9,18	11,92	19,35	23,49	29,30	35,47	55,04
ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»	2,30	6,16	12,17	17,24	19,02	28,04	37,60		
ФГУП «ПО «Маяк»	2,68	13,64	26,92	45,67	63,92	80,47	94,89	116,56	135,18
ФГУП «ПСЗ»	2,02	7,63	22,93	53,62	67,17	96,01	163,96		
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина»	1,45	4,43	11,39	18,25	25,87	29,22	56,89	69,33	51,87
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»	0,88	3,87	10,74	12,88	26,78	23,83	35,47	49,70	93,47
ФГУП «УЭМЗ»	0,40	1,57							
Среднее	1,61	8,05	17,16	30,66	42,89	55,39	81,86	67,77	79,78

Таблица 2.3.5.

Средний пожизненный атрибутивный риск заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями: LAR на 10000 человек, для различных групп персонала по стажу на ИДК в 2011 г., для планируемого облучения 200 мЗв в 2012 г.

Предприятие	Стаж на ИДК (лет)								
	(0, 5]	(5, 10]	(10, 15]	(15, 20]	(20, 25]	(25, 30]	(30, 35]	(35, 40]	40+
ФГУП «ВНИИА»		167,00	86,00	139,69					78,41
ФГУП «Комбинат «ЭХП»	102,94	110,59	111,56	115,90	138,76	167,31	200,99		
ФГУП «НИИП»	70,04	64,09	102,18	54,75	59,05	51,74	60,29	56,30	70,09
ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»	91,52	95,39	88,70	77,86	50,01	56,29	60,79		
ФГУП «ПО «Маяк»	99,58	114,59	132,05	146,61	144,51	149,38	147,99	162,68	163,44
ФГУП «ПСЗ»	102,96	104,54	112,16	146,62	139,81	160,68	228,63		
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина»	98,36	97,44	100,62	103,07	94,78	78,80	87,88	97,58	57,38
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»	90,11	93,10	87,28	69,65	87,41	69,95	63,73	75,36	100,08
ФГУП «УЭМЗ»	46,52	44,40							
Среднее	87,8	99,0	102,6	106,8	102,0	104,9	121,5	98,0	93,9

Таблица 2.3.6.

Средняя текущая пожизненная атрибутивная доля заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями: LARF, в %, для различных групп персонала по стажу на ИДК в 2011 г.

Предприятие	Стаж на ИДК (лет)									
	(0,5]	(5,10]	(10,15]	(15,20]	(20,25]	(25,30]	(30,35]	(35,40]	40+	
ФГУП «ВНИИА»		1,08	1,10	1,76					3,05	
ФГУП «Комбинат «ЭХП»	0,09	0,44	0,84	2,02	3,30	4,45	6,30			
ФГУП «НИИП»	0,05	0,15	0,42	0,52	0,84	1,05	1,29	1,64	2,66	
ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»	0,10	0,28	0,54	0,75	0,84	1,25	1,71			
ФГУП «ПО «Маяк»	0,12	0,63	1,24	2,07	2,78	3,42	3,96	4,81	5,74	
ФГУП «ПСЗ»	0,09	0,35	1,03	2,39	2,89	4,04	6,71			
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина»	0,07	0,20	0,51	0,82	1,13	1,25	2,47	3,03	3,18	
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»	0,04	0,18	0,48	0,56	1,16	1,02	1,57	2,22	5,34	
ФГУП «УЭМЗ»	0,02	0,07								

Таблица 2.3.7.

Средняя пожизненная атрибутивная доля заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями: LARF, в %, для различных групп персонала по стажу на ИДК в 2011 г., для планируемого облучения 200 мЗв в 2012 г.

Предприятие	Стаж на ИДК (лет)								
	(0, 5]	(5, 10]	(10, 15]	(15, 20]	(20, 25]	(25, 30]	(30, 35]	(35, 40]	40+
ФГУП «ВНИИА»		7,63	3,62	6,07					3,75
ФГУП «Комбинат «ЭХП»	4,54	4,86	4,84	4,85	5,72	6,81	8,02		
ФГУП «НИИП»	2,99	2,72	4,46	2,33	2,51	2,28	2,61	2,58	3,37
ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»	3,98	4,14	3,80	3,29	2,17	2,47	2,74		
ФГУП «ПО «Маяк»	4,37	5,03	5,79	6,35	6,08	6,16	6,04	6,59	6,86
ФГУП «ПСЗ»	4,54	4,58	4,84	6,27	5,83	6,58	9,11		
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина»	4,32	4,26	4,36	4,44	4,00	3,30	3,76	4,21	3,51
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»	3,92	4,05	3,74	2,94	3,68	2,95	2,79	3,33	5,69
ФГУП «УЭМЗ»	1,98	1,89							

Таблица 2.3.8.

Средний текущий пожизненный атрибутивный риск заболеваемости злокачественными новообразованиями лимфоидной и кроветворной тканей: LAR на 10000 человек, для различных групп персонала по стажу на ИДК в 2011 г.

Предприятие	Стаж на ИДК (лет)								
	(0, 5]	(5, 10]	(10, 15]	(15, 20]	(20, 25]	(25, 30]	(30, 35]	(35, 40]	40+
ФГУП «ВНИИА»		1,59	2,66	1,96					2,57
ФГУП «Комбинат «ЭХП»	0,27	0,93	1,35	3,21	4,36	4,62	6,19		
ФГУП «НИИП»	0,20	0,49	0,67	1,08	1,35	1,48	1,40	1,57	2,24
ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»	0,34	0,68	1,05	1,27	1,49	1,76	2,00		
ФГУП «ПО «Маяк»	0,38	1,31	1,78	2,31	2,94	3,22	3,52	3,76	4,46
ФГУП «ПСЗ»	0,28	0,76	1,74	2,90	3,33	4,00	5,46		
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина»	0,21	0,46	0,86	1,06	1,32	1,41	2,71	2,78	2,73
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»	0,13	0,43	0,93	0,99	1,49	1,19	1,76	2,06	4,75
ФГУП «УЭМЗ»	0,09	0,26							
Среднее	0,24	0,77	1,38	1,85	2,33	2,53	3,29	2,54	3,35

Таблица 2.3.9.

Средний пожизненный атрибутивный риск заболеваемости злокачественными новообразованиями лимфоидной и кроветворной тканей: LAR на 10000 человек, для различных групп персонала по стажу на ИДК в 2011 г., для планируемого облучения 200 мЗв в 2012 г.

Предприятие	Стаж на ИДК (лет)								
	(0, 5]	(5, 10]	(10, 15]	(15, 20]	(20, 25]	(25, 30]	(30, 35]	(35, 40]	40+
ФГУП «ВНИИА»		18,19	16,49	18,34					11,66
ФГУП «Комбинат «ЭХП»	16,65	17,30	17,25	17,53	18,19	18,45	18,87		
ФГУП «НИИП»	14,52	14,32	16,57	13,50	13,48	12,40	12,61	11,48	11,32
ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»	15,98	16,31	15,96	15,10	12,70	12,69	12,27		
ФГУП «ПО «Маяк»	16,52	17,69	18,36	18,69	18,11	17,54	16,76	16,44	15,39
ФГУП «ПСЗ»	16,65	16,91	17,37	18,79	17,95	18,09	19,54		
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина»	16,35	16,36	16,50	16,47	15,64	14,33	13,92	13,71	9,45
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»	15,76	16,06	15,84	14,54	15,32	13,87	12,69	12,68	11,86
ФГУП «УЭМЗ»	12,77	12,68							
Среднее	15,7	16,2	16,8	16,6	15,9	15,3	15,2	13,6	11,9

Таблица 2.3.10.

Средняя текущая пожизненная атрибутивная доля заболеваемости злокачественными новообразованиями лимфоидной и кроветворной тканей: LARF, в %, для различных групп персонала по стажу на ИДК в 2011 г.

Предприятие	Стаж на ИДК (лет)								
	(0, 5]	(5, 10]	(10, 15]	(15, 20]	(20, 25]	(25, 30]	(30, 35]	(35, 40]	40+
ФГУП «ВНИИА»		3,28	5,13	3,93					5,70
ФГУП «Комбинат «ЭХП»	0,57	1,90	2,73	6,12	8,13	8,58	11,23		
ФГУП «НИИП»	0,40	0,98	1,37	2,18	2,73	3,07	2,88	3,40	4,99
ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»	0,70	1,38	2,11	2,52	3,07	3,64	4,23		
ФГУП «ПО «Маяк»	0,78	2,66	3,58	4,60	5,69	6,14	6,67	7,15	8,73
ФГУП «ПСЗ»	0,58	1,56	3,47	5,67	6,35	7,51	9,98		
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина»	0,43	0,95	1,76	2,13	2,62	2,79	5,44	5,62	7,65
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»	0,27	0,87	1,87	1,98	2,93	2,38	3,64	4,30	12,01
ФГУП «УЭМЗ»	0,19	0,54							

Таблица 2.3.11.

Средняя пожизненная атрибутивная доля заболеваемости злокачественными новообразованиями лимфоидной и кроветворной тканей: LARF, в %, для различных групп персонала по стажу на ИДК в 2011 г., для планируемого облучения 200 мЗв в 2012 г.

Предприятие	Стаж на ИДК (лет)									
	(0, 5]	(5, 10]	(10, 15]	(15, 20]	(20, 25]	(25, 30]	(30, 35]	(35, 40]	40+	
ФГУП «ВНИИА»		27,93	25,10	27,64					21,49	
ФГУП «Комбинат «ЭХП»	25,76	26,50	26,35	26,24	26,98	27,26	27,85			
ФГУП «НИИП»	22,76	22,53	25,57	21,73	21,81	21,03	21,09	20,43	21,00	
ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»	24,84	25,23	24,61	23,48	21,21	21,41	21,29			
ФГУП «ПО «Маяк»	25,57	26,93	27,72	28,02	27,10	26,26	25,42	25,17	24,83	
ФГУП «ПСЗ»	25,76	26,01	26,44	28,04	26,78	26,86	28,41			
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина»	25,37	25,33	25,44	25,34	24,10	22,57	22,79	22,73	22,27	
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»	24,59	24,94	24,47	22,81	23,73	22,10	21,40	21,61	25,41	
ФГУП «УЭМЗ»	20,71	20,69								

Таким образом, получено, что для персонала предприятий ЯОК ГК «Росатом», состоявшего на ИДК в 2011 г. и допущенного к планируемому повышенному облучению, максимальные значения среднего пожизненного атрибутивного риска и средней пожизненной атрибутивной доли заболеваемости солидными раками достигаются в одних и тех же группах по стажу на ИДК, но в зависимости от рассматриваемого предприятия. Несмотря на то, что максимальная из средних накопленных доз – 345,8 мЗв – наблюдалась для стажа на ИДК более 40 лет (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»), наибольшими рисками планируемого повышенного облучения характеризуется ФГУП «ПСЗ» в группе по стажу на ИДК 30–35 лет ($LAR=2,3 \times 10^{-2}$, $LARF=9,1\%$).

Максимальные значения среднего пожизненного атрибутивного риска и средней пожизненной атрибутивной доли заболеваемости злокачественными новообразованиями лимфоидной и кроветворной тканей достигаются в различных

группах по стажу на ИДК. Наибольшими рисками планируемого повышенного облучения также характеризуется ФГУП «ПСЗ» в группе по стажу на ИДК 30–35 лет ($LAR=0,2 \times 10^{-2}$, $LARF=28,4 \%$).

2.4. Планирование профессионального облучения с учетом ограничения на величину индивидуального радиационного риска

Оценку радиационных рисков, их прогноз следует использовать для планирования доз облучения персонала. Цель такого планирования состоит в недопущении увеличения численности группы повышенного профессионального риска.

По данным системы АРМИР, число лиц с повышенным риском составляет около 1,3 % от численности персонала, у которого определен радиационный риск. Ещё почти 10 % работников имеют радиационный риск больше, чем $2 \cdot 10^{-4}$, но меньше, чем 10^{-3} . Управлять радиационными рисками таких работников можно, планируя для них индивидуальные дозы облучения таким образом, чтобы риски от планируемых доз облучения не превышали величину 10^{-3} , с учетом рисков от существующего облучения.

При нормальной эксплуатации техногенных источников ионизирующего излучения недопущение увеличения численности группы повышенного риска не потребует значимого изменения коллективной дозы. Покажем это на реальных данных. На рис. 2.4.1 приведено распределение численности персонала по величине прогнозируемого риска. Для наглядности на рисунке показана только численность персонала, у которого прогнозируемый риск больше, чем $2 \cdot 10^{-4}$. Это 14 % от общей численности персонала. Прогноз радиационного риска был выполнен, исходя из предположения, что в течение последующих

восьми лет каждый работник будет получать такую же дозу облучения, как в текущем году. Из расчётов радиационного риска были исключены работники, уже входящие в группу повышенного риска.

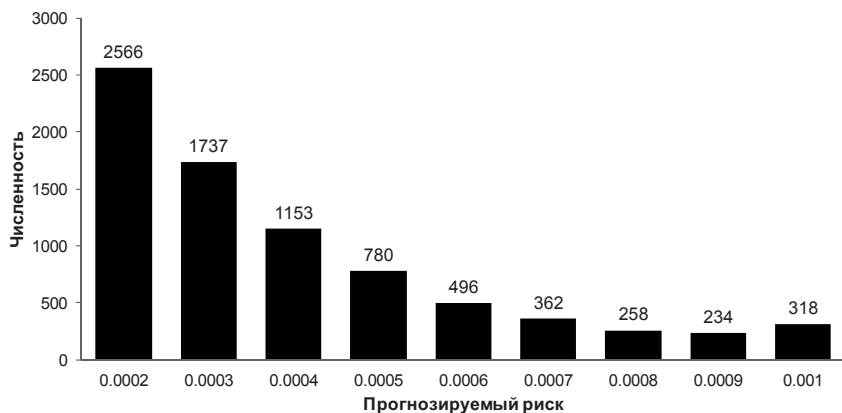


Рис. 2.4.1. Гистограмма численности персонала, у которого прогнозируемый риск больше, чем 0,0002

Согласно расчётам, группа повышенного риска (риск больше 0,001) увеличится на 318 человек. Этим работникам рекомендовано снижение дозовой нагрузки. Индивидуальная накопленная доза у этой группы работников находится в интервале от 206 до 684 мЗв, среднее значение – 402 мЗв. Средняя доза облучения в текущем году – 6,3 мЗв, средний возраст – 51 год, средний стаж – 28 лет. Ещё 492 работника будут находиться в непосредственной близости от порога, определяющего группу повышенного риска. Даже незначительное увеличение дозовой нагрузки данного персонала может привести к увеличению численности группы повышенного риска. Диапазон накопленных доз у этой группы работников 108–440 мЗв, среднее значение – 283 мЗв. Средняя доза облучения в текущем году – 4,2 мЗв, средний возраст – 56 лет, средний стаж – 30 лет.

2.5. Радиационная обусловленность возможных онкологических заболеваний работников атомной отрасли

Конвенция Международной организации труда № 121 «О пособиях в случаях производственного травматизма» требует, чтобы работники, у которых развился рак в результате профессионального облучения, получили компенсацию. Рак – широко распространенное заболевание. В развитых странах более трети населения заболевает раком в течение жизни, а от одной пятой до одной четверти лиц умирает от злокачественных заболеваний. Поэтому среди работников атомной отрасли, профессионально подвергающихся воздействию радиации, у подавляющего большинства лиц рак будет развиваться по причинам, не связанным с их работой.

В настоящее время невозможно клинически отличить радиационно-индуцированные раки от злокачественных новообразований, вызванных другими причинами. Для того чтобы определить степень причинно-следственной связи онкологического заболевания с воздействием ионизирующей радиации, была разработана методология «установленной доли» (*assigned share methodology*). В отечественной литературе также используются термины «этиологическая доля», «атрибутивный риск». В случае возникновения онкологического заболевания работнику (бывшему работнику) на основе полученных им доз облучения и других индивидуальных характеристик рассчитывается величина, численно равная отношению избыточного относительного риска к относительному риску. Чем больше эта величина – «установленная доля», тем больше вероятность того, что рак вызван профессиональным облучением.

Программа компенсации заболеваний, вызванных радиацией (*Compensation Scheme for Radiation Linked Diseases*) начала действовать в Великобритании с ноября 1982 года в виде соглашения между профсоюзами и работодателями [<http://www.csrl.org.uk>]. Общая сумма выплат составила 5,3 миллиона фунтов стерлингов. Компенсации

выплачивались с использованием пропорциональной системы: если рассчитанная величина «установленной доли» составляла 50 % или больше, работник, заболевший раком, получал полную сумму, 40–49,9 % – три четверти полной суммы, 30–39,9 % – половину полной суммы, 20–29,9 % – одну четверть полной суммы, менее 20 % – требование компенсации отклонялось.

Размер «полной суммы» зависел от тяжести заболевания. Использование пропорциональной системы выплат позволило учесть неопределённости, имеющиеся в процедуре вычисления «установленной доли». Среди работников, получивших компенсацию, две трети имела величину «установленной доли» меньше 50 %, и эти люди не получили бы компенсации через суд.

С октября 2000 года в США действует Закон о программе компенсаций профессиональных заболеваний работников атомной промышленности (*Energy Employees Occupational Illness Compensation Program Act*) [www.cdc.gov/niosh/ocas]. Закон указывает, что возмещимость претензии на компенсацию должна «основываться на полученной работником дозе облучения... и верхней границе 99-процентного доверительного интервала вероятности причинно-следственной связи». Таким способом учитываются неопределённости, возникающие при вычислении вероятности причинно-следственной связи (в более поздней терминологии – «установленной доли»), в том числе неопределённость в оценках доз, полученных работником. Неопределённости доз облучения, полученных работниками на различных предприятиях за все время их существования, определяются специально созданным консорциумом. Трудоемкость этой работы является главной причиной того, что из 21 тысячи поданных требований рассмотрено менее 10 %. Каждое второе из рассмотренных требований компенсации удовлетворено. Общая сумма выплат составила 65 миллионов долларов.

В РФ определение порогового значения этиологиче-

ской доли для конкретного заболевания, а следовательно – и степени связи заболевания с облучением является прерогативой врача-эксперта. Так, в «Руководстве по оценке профессионального риска для здоровья работников» утвержденном Главным санитарным врачом России [Гигиена труда, 2003], приведена оценка степени причинно-следственной связи нарушения здоровья с работой (табл. 2.5.1).

Таблица 2.5.1.

Оценка степени причинно-следственной связи нарушения здоровья с работой. EF – этиологическая доля

EF = 0	EF < 33 %	EF = 33–50 %	EF = 51–66 %	EF = 67–80 %	EF = 81–100 %
Нулевая	Малая	Средняя	Высокая	Очень высокая	Почти полная
Общие заболевания		Профессионально обусловленные заболевания		Профессиональные заболевания	

Там же указано, что «для ряда нарушений здоровья, прогрессирующих даже после прекращения экспозиции, их считают профессионально обусловленными (связанными с работой) уже при этиологической доле 25–40 %, учитывая их неблагоприятный медицинский прогноз».

С использованием системы АРМИР была выполнена оценка радиационной обусловленности возможных онкологических заболеваний работников предприятий ГК «Росатом». В табл. 2.5.2 приведены значения среднего атрибутивного риска в зависимости от пола, стажа и принадлежности к группам повышенного и потенциального риска для всего персонала ГК «Росатом». Группу повышенного риска, составляют работники с индивидуальным радиационным риском более 10^{-3} год⁻¹. Группу потенциального риска составляют работники с индивидуальным радиационным риском от $2 \cdot 10^{-4}$ год⁻¹ до 10^{-3} год⁻¹ включительно.

Таблица 2.5.2.

Средний атрибутивный риск (%) персонала в зависимости от пола, стажа и принадлежности к группам повышенного и потенциального риска

Стаж на ИДК, лет	группа повышенного риска			группа потенциального риска			остальные		
	муж.	жен.	оба пола	муж.	жен.	оба пола	муж.	жен.	оба пола
все	12,37	14,55	12,41	5,24	5,44	5,26	1,21	0,43	1,09
до 20	8,86	-	8,86	4,06	5,04	4,13	1,13	0,25	0,99
20-24	10,63	-	10,63	6,92	4,99	6,79	2,05	1,86	2,02
25-29	13,91	15,3	13,92	6,1	5,22	5,97	1,8	2,17	1,86
30-34	13,15	14,14	13,16	4,82	5,6	4,91	1,57	1,78	1,59
35-39	12,32	13,33	12,34	4,24	5,99	4,42	1,21	1,9	1,27
40-44	11,52	14,69	11,66	3,4	5,71	3,61	1,2	1,5	1,23
45-49	10,05	15,57	10,47	3,09	4,87	3,3	0,9	1,78	1,08
больше 50	10,36	-	10,36	4,88	-	4,88	-	-	-

Как видно из таблицы, средний атрибутивный риск достигает максимального значения в группе повышенного риска для женщин, имеющих стаж 45–49 лет. Согласно выполненным расчетам, пороговое значение индивидуального атрибутивного риска 20 % превышено только у 61 работника (максимальное значение индивидуального атрибутивного риска составило 27 %).

Наряду с относительной численностью групп риска, значения среднего атрибутивного риска в этих группах могут быть использованы как целевые индикаторы, характеризующие различные аспекты радиационной безопасности на предприятиях и в отрасли.

ГЛАВА 3

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПТИМИЗАЦИИ РАДИОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ПЕРСОНАЛА С УЧЁТОМ ОБОБЩЁННОГО РИСКА ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ОБЛУЧЕНИЯ

3.1. Оценка потенциального облучения в системе радиационной защиты

Рекомендаций МКРЗ 2007 года и НРБ-99/2009

В современной системе радиологической защиты МКРЗ [МКРЗ, Публикация 103, 2009] введены категории «ситуаций облучения», причём в ситуациях «планируемого облучения» выделяется подкатегория «потенциальное облучение». МКРЗ отмечает: «В ситуациях планового облучения вполне резонно ожидается, что будет получена определённая доза облучения. Вместе с тем, уровень облучения может оказаться более высоким вследствие отступления от плановых рабочих процедур и аварий, в том числе, связанных с потерей контроля над источниками излучения и злоумышленными действиями. Такое облучение заранее не планируется, хотя сама возможность такой ситуации предусматривается. Комиссия называет это потенциальным облучением» [МКРЗ, Публикация 103, 2009] (п. 262).

По мнению МКРЗ, потенциальное облучение подразумевает три типа событий: 1) при которых потенциальное облучение может коснуться главным образом людей, которые подвергаются плановому облучению; 2) при которых потенциальное облучение может затронуть большее количество людей; 3) при которых потенциальное облучение может произойти в далеком будущем и дозы облучения будут получены на протяжении длительного периода времени. К обеспечению радиационной безопасности пер-

сонала в условиях потенциального облучения относится, прежде всего, первый тип из вышеперечисленных событий.

В ситуации планируемого облучения при обычной практической деятельности облучение персонала является результатом нормальных условий работы. При этом величина облучений варьируется с изменением условий работы. Некоторые вариации в облучении являются ожидаемыми и могут быть подвергнуты управленческому или регуляторному контролю. Однако, иногда могут возникать вариации облучения, которые не могут рассматриваться как обычные. Они могут привести к годовым дозам за пределами диапазона величин годовых доз, характерных для ситуаций планируемого облучения, но необязательно за установленными НРБ дозовыми пределами. В Рекомендациях МКРЗ 2007 г. отмечается, что обычно существует связь между потенциальными облучениями и облучениями, возникающими в ситуациях планируемого облучения [МКРЗ, Публикация 103, 2009] (п. 263). В случае облучения персонала решения, касающиеся оценки потенциального облучения, могут основываться на обобщении имеющейся информации об облучении в нормальной контролируемой ситуации [МКРЗ, Публикация 103, 2009] (п. 268). В нормальной ситуации с увеличением дозы риск увеличивается, но вероятность такого облучения обычно уменьшается. Здесь следует ещё раз подчеркнуть, что понятие потенциального облучения, приведённое в Рекомендациях МКРЗ 2007 г. покрывает все диапазоны пределов и ограничений, и на него распространяется принцип оптимизации.

По мнению МКРЗ ([МКРЗ, Публикация 103, 2009], п. 266), «оценка потенциального облучения для целей планирования или оценки защитных мероприятий обычно основывается на:

- а) разработке типичных сценариев, которые представляют последовательность событий, приводящих к облучениям;
- б) оценке вероятностей каждой из этих последовательностей;
- в) оценке результирующей дозы;

г) оценке ущерба, связанного с такой дозой;
д) сравнении результатов с некоторым критерием приемлемости;

е) оптимизации защиты, что может потребовать нескольких итераций предыдущих шагов».

По мнению МКРЗ ([МКРЗ, Публикация 103, 2009], п. 267), «решения о приемлемости потенциальных облучений должны учитывать как вероятность возникновения облучения, так и его величину... полезно рассматривать индивидуальную вероятность радиационно-обусловленной смерти, нежели эффективную дозу. Для этой цели вероятность определяется как произведение вероятности получить определённую дозу в год и пожизненной вероятности радиационно-обусловленной смерти от этой полученной дозы. Результирующая вероятность затем может сравниваться с ограничением риска».

По потенциальному облучению персонала Комиссия рекомендует использовать понятие рисков, а не дозовых ограничений, на уровне ограничений обобщённого риска 2×10^{-4} в год [МКРЗ, Публикация 103, 2009] (п. 268).

Эта рекомендация, с уточнением понятия обобщённого риска, принята и в действующих российских Нормах радиационной безопасности НРБ-99/2009 (СанПиН 2.6.1.2523-09) [НРБ-99/2009, 2009], (п. 2.3): «При обосновании защиты от источников потенциального облучения в течение года принимаются следующие граничные значения обобщенного риска (произведение вероятности события, приводящего к облучению, и вероятности смерти, связанной с облучением):

- персонал – $2,0 \times 10^{-4}$, год⁻¹;
- население – $1,0 \times 10^{-5}$, год⁻¹».

Действующие НРБ-99/2009 содержат основные пределы облучения, ориентированные на индивидуума (пп. 2.3, 3.1 и 3.2). Например, для персонала предел индивидуального риска от облучения в течение года составляет 1×10^{-3} (п. 2.3): «пределы доз... устанавливаются исходя из следующих значений индивидуального пожизненного риска: для персонала – $1,0 \times 10^{-3}$ ». При достижении этого индивидуального предела

100 % лиц из персонала группы А граничное значение обобщённого риска было бы превышено в пять раз. Если при облучении в течение года группы из 10 человек один человек будет иметь риск 1×10^{-3} /год, а девять – $1,1 \times 10^{-4}$ /год, то обобщённый риск = $(1 \times 10^{-3} + 9 \times 1,1 \times 10^{-4})/10 = 1,99 \times 10^{-4}$ /год, т.е. чуть меньше граничного значения ОРПО.

Таким образом, ограничение обобщённого риска должно относиться к группе лиц, для его соблюдения к пределам облучения может приближаться только какая-то часть из группы персонала. Фактически, это ограничение нормативно закрепляет достигнутый уровень радиационной безопасности на предприятиях атомной отрасли.

В соответствии с принципом оптимизации (НРБ-99/2009, п. 2.1), обобщённый риск должен поддерживаться на возможно низком и достижимом уровне, при условии одновременного соблюдения ограничения обобщённого риска и индивидуальных пределов облучения.

3.2. Оценка обобщённого риска потенциального облучения

Введя обозначения P_1 – для вероятности облучения в дозе d и P_2 – для вероятности радиационно-индуцированной гибели в результате облучения в дозе d , формально ограничение обобщённого риска GR можно записать как:

для всех i : $GR(d_i) = P_1(d_i) \cdot P_2(d_i) < 2 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$ (3.2.1),

где i – индекс, пробегающий все потенциально возможные альтернативные варианты облучения индивидуумов в течение года в группе облучённых лиц.

В докладе «Потенциальное облучение в ядерной безопасности» («Potential exposure in nuclear safety» Международной консультативной группы по ядерной безопасности при МАГАТЭ (INSAG)) [IAEA, 1995] под величиной риска для ситуаций потенциального облучения при малых дозах понимается математическое ожидание последствий облучения [IAEA, 1995] (пп. 6, 47).

Математическое ожидание радиологических последствий можно представить как математическое ожидание **GR** пожизненного риска радиационно-индуцированной гибели индивидуума $P_2(d_i)$ в результате облучения в течение года в какой-нибудь из доз d_i , имеющих вероятности $P_1(d_i)$:

$$GR = \sum_{\forall i} P_1(d_i) \cdot P_2(d_i) \quad (3.2.2),$$

где i – индекс, пробегающий все возможные индивидуальные дозы d_i , $P_2(d_i)$ – индивидуальный пожизненный риск от облучения в течение года дозой d_i , а вся сумма – математическое ожидание этого риска.

Выбор определения обобщённого риска потенциального облучения в виде (3.2.2) является консервативным. Сумма неотрицательных слагаемых (3.2.2) максимальна, когда суммирование включает все возможные дозы облучения ($d_i > 0$), а не только дозы выше некоторого выбранного значения D ($d_i > D$).

Используя коэффициент номинального риска $4,1 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$ для персонала из НРБ-99/2009, математическое ожидание риска (обобщённый риск) можно было бы представить как:

$$GR = \sum_{\forall i} P_2(d_i) \cdot P_1(d_i) = \sum_{\forall i} (4,1 \cdot 10^{-2} \cdot d_i) \cdot P_1(d_i) \leq 2 \cdot 10^{-4} \quad (3.2.3),$$

где i – индекс, пробегающий все возможные индивидуальные дозы d_i , $(4,1 \cdot 10^{-2} \cdot d_i)$ – пожизненный риск (номинальный) от облучения в течение года дозой d_i , сумма – математическое ожидание этого риска (обобщённый риск); последнее неравенство обозначает ограничение по обобщённому риску [НРБ-99/2009, 2009].

Так определённое ограничение риска могло бы представлять собой верхнюю границу приемлемости потенциального облучения. Однако, коэффициент номинального риска не предназначен для оценки радиологических последствий в какой-либо конкретной популяции, а тем более для конкретного индивидуума.

Методы оценки индивидуального радиационного рис-

ка, в том числе пожизненного риска радиационно-индуцированной гибели по моделям МКРЗ-2007, были приведены в Главе 1.

Вероятность радиационно-индуцированной гибели индивидуума $P_2(d_i)$ зависит от его возраста, пола, эпидемиологических характеристик популяции, представителем которой он является. Величина обобщённого риска GR (3.2.3) зависит, помимо распределения доз, от демографических и эпидемиологических характеристик рассматриваемой группы персонала.

Если выбрать гомогенную по облучаемости группу, в которой распределение доз не зависит от возраста, использовать линеаризацию P_2 по d для малых доз (менее 20 мЗв), то GR можно приближённо рассчитать как произведение средней дозы $\bar{d}$ на коэффициент риска на единицу дозы, усреднённый по рассматриваемой группе персонала, $\bar{r}$.

$$GR_s = \sum_{i,j} R_s(d_i, g_j) \cdot P_s(d_i, g_j) = \sum_{i,j} [d_i \cdot r(g_j)] \cdot [p_s(d_i) \cdot q_s(g_j)] =$$

$$= \bar{d} \cdot \bar{r} \approx \bar{d} \cdot r(\bar{g}) \quad (3.2.4),$$

$$\bar{r} = C \cdot \int_{g_1}^{g_2} e^{\gamma \cdot g} \cdot f(g) \cdot dg \approx C \cdot \frac{1}{g_2 - g_1} \cdot \gamma^{-1} \cdot (e^{\gamma \cdot g_2} - e^{\gamma \cdot g_1}) \cdot e^{-\gamma \cdot \left(\frac{g_2 + g_1}{2}\right)} \cdot e^{\gamma \cdot \left(\frac{g_2 + g_1}{2}\right)}$$

$$(3.2.5),$$

$$\bar{r} \approx 1,02 \cdot e^{\gamma \cdot \left(\frac{g_2 + g_1}{2}\right)} \approx 1,02 \cdot r(\bar{g}) \quad (3.2.6),$$

где C – константа, $\bar{g}$ – средний возраст в группе, 1,02 – поправочный множитель для модели МКРЗ [МКРЗ, Публикация 103, 2009] в случае выбора возрастной группы шириной 40 лет.

Согласно моделям радиационных рисков (Глава 1) для солидных раков и лейкозов, вероятность пожизненного риска смерти от радиогенных раков на единицу дозы 1 Зв $P_2(s, g, t)$ является функцией пола (s), возраста при облучении (g) и времени после облучения (t).

Рассмотрим структуру $P_2(s, g, t)$. После облучения дозой потенциального облучения, в последующие годы человек, с

учетом латентного периода индукции радиогенных раков, может умереть от радиогенного рака, индуцированного этой дозой. Вероятность (частота) таких событий в год определяется радиогенной добавкой к спонтанной интенсивности. Кроме того, человек в последующие годы (после облучения) может умереть от причин, не связанных с облучением (спонтанная смертность), то есть мы имеем два конкурирующих процесса. Человек может умереть от радиогенного рака, при условии, что в определённом году t не умрет от других причин (в том числе и от спонтанного рака). Таким образом, это условие можно записать в виде $S(s, g+t) \cdot \delta\lambda(s, g+t)$, где S – вероятность дожить при облучении в возрасте g до возраста $g+t$, $\delta\lambda$ – добавка к годовой смертности от рака, обусловленная облучением единичной дозой. Эта добавка в радиационной эпидемиологии называется избыточным абсолютным риском EAR (excess absolute risk) на единицу дозы. Тогда выражение $S(s, g+t) \cdot \delta\lambda(s, g+t) dt$ соответствует числу смертей от радиогенного рака среди доживших от возраста при облучении g до возраста $g+t$ за интервал времени dt .

Для определения обобщенного риска (пожизненного) на единицу дозы 1 Зв необходимо просуммировать (проинтегрировать) годовые радиационные риски) в течение предстоящей жизни:

$$P_2(s, g, T) = \int_0^{T-g} S(s, g, g+x) \cdot EAR(s, g+x) \cdot \Phi(x-lp) dx \quad (3.2.7),$$

здесь величина T – принятая максимальная продолжительность предстоящей жизни (в нашем случае принимаем ее равной 70 годам); Φ – ступенчатая функция Хэвисайда, учитывающая латентный период lp лет, равная 0 при $t < lp$, 0,5 при $t = lp$ и 1 при $t > lp$. Примем значение $lp = lps = 10$ для солидных раков и $lp = lpl = 2$ для лейкозов.

В формуле (3.2.7) величина EAR и латентный период являются принятыми международными стандартами, а функция S зависит от медико-демографических свойств рассматриваемой популяции (смертности от всех причин и

смертности от рака в зависимости от достигнутого возраста).

При прогнозе радиационных рисков различия в динамике годовых показателей приводят к различиям в интегральных показателях, таких как пожизненный риск. Как показывают вычисления, наиболее существенное значение для величины пожизненного радиационного риска имеет функция дожития и повозрастные показатели онкологической заболеваемости.

На рис. 3.2.1 приведены функции дожития мужчин для трёх различных популяций, а на рис. 3.2.2 и 3.2.3 – повозрастные показатели заболеваемости солидными раками и лейкозами для мужчин в этих же популяциях. Здесь евро-американская и азиатская популяции – это те стандартные популяции, по которым рассчитаны номинальные коэффициенты риска в Рекомендациях МКРЗ 2007 г. [МКРЗ, Публикация 103, 2009], а российская популяция приведена по данным российской статистики за 2005 г. (календарный год, равный среднему календарному году для данных о стандартных популяциях [МКРЗ, Публикация 103, 2009]). Обращает на себя внимание отсутствие адекватных российских данных для возрастов старше 75 лет. До 75-ти лет российские показатели по солидным ракам мало отличаются от тех, которые приводит МКРЗ для стандартной азиатской популяции.

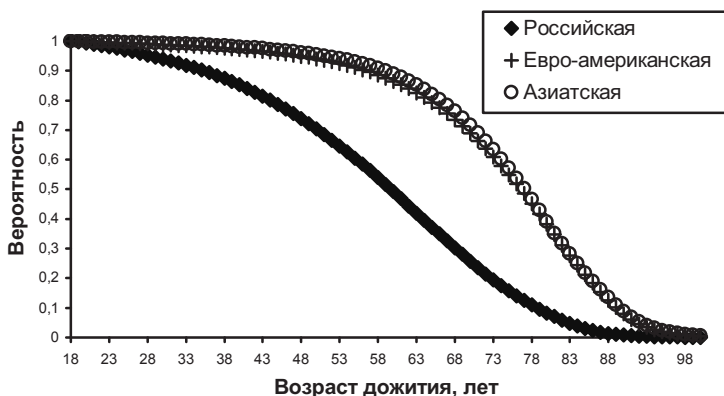


Рис. 3.2.1. Вероятность дожития 18-летних мужчин в различных популяциях

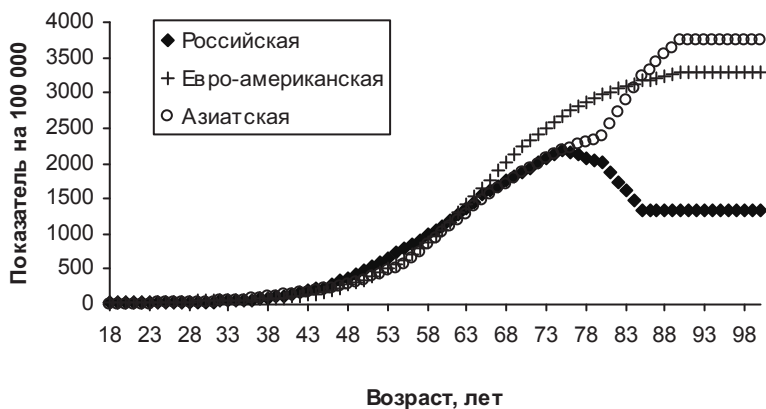


Рис. 3.2.2. Возрастные показатели заболеваемости солидными раками в различных популяциях

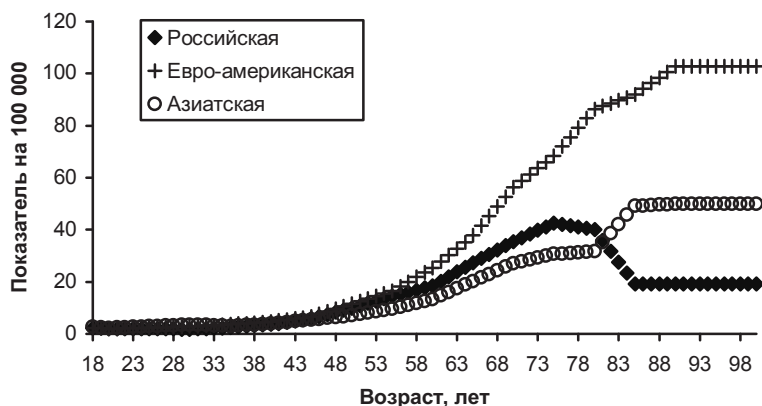


Рис. 3.2.3. Возрастные показатели заболеваемости лейкозами в различных популяциях

На рис. 3.2.4 показано, что определяющую роль при прогнозе пожизненного риска играют национальные данные – более низкие пожизненные риски для российской популяции определяются меньшим дожитием (см. рис. 3.2.1 выше). В данном случае особенности различных моделей радиационного риска имеют меньшее значение.

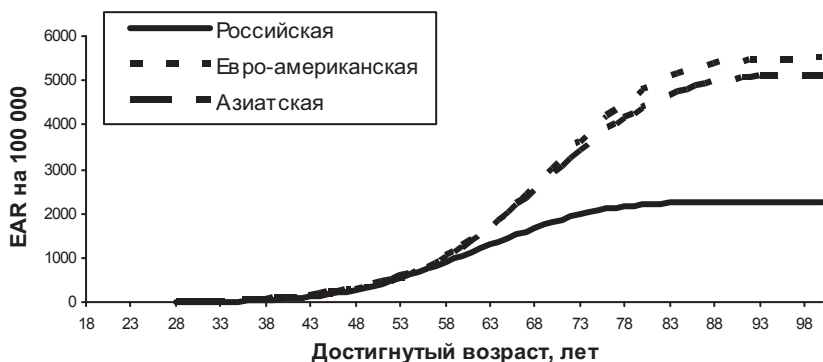


Рис. 3.2.4. Прогноз накопленного избыточного абсолютного риска заболевания солидными раками (модель МКРЗ-2007), скорректированного с учетом функции дожития, для различных популяций

В качестве примера величины пожизненного риска заболевания солидными раками для модельного сценария облучения приведены в табл. 3.2.1.

Таблица 3.2.1.
Пожизненный атрибутивный риск (LAR на 100 000 чел.) заболевания солидными раками; работник с 18 до 64 лет ежегодно получал дозу облучения 20 мЗв

Популяция	LAR
Российская	2255
Евро-американская	5484
Азиатская	5112

На рис. 3.2.5 показано накопление радиационного риска для заболеваемости лейкозами. По-прежнему определяющую роль при прогнозе пожизненного риска играют национальные данные – более низкие пожизненные риски для российской популяции определяются меньшим дожитием (см. рис. 3.2.1 выше).

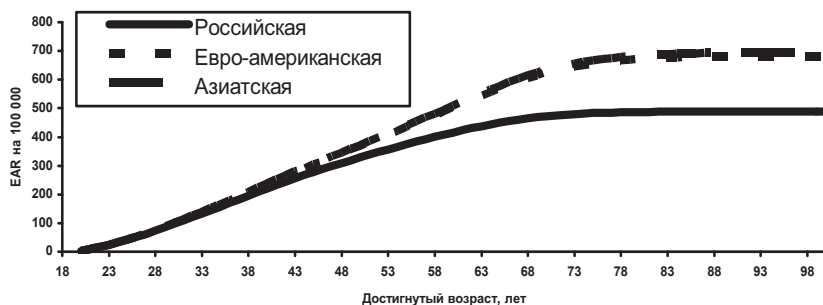


Рис. 3.2.5. Прогноз накопленного избыточного абсолютного риска заболевания лейкозами с учетом функции дожития для различных популяций

В качестве примера величины пожизненного риска заболевания лейкозами для модельного сценария облучения приведены в табл. 3.2.2.

Таблица 3.2.2.
Пожизненный атрибутивный риск (LAR на 100 000 чел.) заболевания лейкозами; работник с 18 до 64 лет ежегодно получал дозу облучения 20 мЗв

Популяция	LAR
Российская	488
Евро-американская	681
Азиатская	694

Необходимо отметить, что для условий острого облучения модели радиационных рисков НКДАР ООН и МКРЗ обеспечивают приблизительно одинаковое качество подгонки под наблюдаемые числа заболеваний или смертей. Различие между моделями в полной мере проявляется при прогнозе радиационных рисков в ситуациях облучения, отличных от тех, при которых модели идентифицировались, т.е. во всех ситуациях, отличных от острого однократного

облучения. В силу зависимости параметров моделей от времени и возраста необходимы прямые вычисления, чтобы проанализировать поведение во времени даже простых интенсивных (погодových) показателей избыточной, радиационно-обусловленной заболеваемости. Для расчёта рисков при произвольных режимах облучения необходимо создание специализированного программного обеспечения.

Приближённые оценки пожизненного риска смертности

Интенсивность смерти от рака в облученной популяции дозой d в возрасте u складывается из спонтанной и радиогенной составляющих:

$$\lambda(s, g, d, u) = \lambda^{sp}(s, u) + \delta \lambda(s, g, d, u) \quad (3.2.8).$$

Для солидных раков, согласно рекомендациям НКДАР ООН, предпочтительна мультипликативная модель радиационного риска:

$$\lambda(s, g, d, u) = \lambda^{sp}(s, u) \cdot (1 + \beta(g, s) \cdot d) \quad (3.2.9),$$

где $\beta(s, g)$ – избыточный относительный риск онкосмертности на дозу 1 Зв для определенного пола и возраста при облучении g .

Из выражения (3.2.9) следует соотношение:

$$EAR(s, g, u) = \lambda^{sp}(s, u) \cdot \beta(s, g) \quad (3.2.10).$$

Например, в рамках модели НКДАР ООН [UNSCEAR, 2000]:

$$\beta(s, g) = \delta \cdot \beta(s) \cdot \exp(\gamma \cdot (g - 30)) \quad (3.2.11),$$

где δ – обратная величина фактора дозы и мощности дозы ($\delta = 1/DDREF$), равная 0,5, $\beta(s)$ – избыточный относительный риск онкосмертности на дозу 1 Зв для определенного пола при возрасте облучения 30 лет. Значение коэффициента β (согласно модели [UNSCEAR, 2000]) равно для мужчин 0,38 и 0,77 для женщин, коэффициент $\gamma = -0,04$, одинаков для обоих полов. Значение $\delta = 0,5$ выбрано согласно рекомендациям МКРЗ [МКРЗ Публикация 103, 2009], для которого получены

значения номинального коэффициента радиационного риска, – 5,5 % для популяции в целом и 4,1 % – для взрослого населения. В дальнейшем индекс пола опускаем для удобства.

Тогда величина пожизненного риска смертности от радиогенных солидных раков на единицу дозы P_{2s} в рамках модели относительного риска рассчитывается по формуле:

$$P_{2s}(g, T) = \beta(g) \cdot \int_0^{T-g} S(g, g+x) \cdot \lambda^{sp}(g+x) \cdot \Phi(x-lps) dx \quad (3.2.12),$$

где S – выживаемость от возраста g до возраста $g+x$; λ^{sp} – показатель онкологической смертности от всех раков в возрасте $g+x$, T – предельный возраст наблюдения.

Для лейкозов модель риска [UNSCEAR, 2000] представлена в терминах избыточного абсолютного риска:

$$EAR_L(s, g, d, t) = \delta \cdot \alpha(g, s) \cdot (d + 0,79 \cdot d^2) \cdot \exp(\gamma(s, g) \cdot (t - 25)) \quad (3.2.13),$$

где EAR_L – избыточный абсолютный риск, коэффициент α представляет собой избыточный абсолютный риск на 10^4 чел.-лет на зиверт, d – доза однократного облучения (Зв), g – возраст при облучении (годы), t – время после облучения (годы).

Величины коэффициентов α и γ , зависящие от пола и возраста при облучении, приведены в табл. 3.2.3.

Таблица 3.2.3.

Значения параметров модели избыточного абсолютного риска лейкозов (EAR_L) в зависимости от пола и возраста при облучении

Пол	Возраст при облучении (лет)	α	γ
Мужчины	0-19	0,33	-0,17
	20-39	0,48	-0,13
	≥ 40	1,31	-0,07
Женщины	0-19	0,66	-0,07
	20-39	0,97	-0,03
	≥ 40	2,64	0,03

Модель разработана для трех возрастных групп при облучении: 0-19, 20-39 и старше 40 лет. Для людей в одной возрастной группе коэффициенты α и γ будут одинаковы. Пожизненный риск лейкозов определится по формуле:

$$P_{2l}(g, T, d) = \int_0^{T-g} S(g, g+x) \cdot EARL(g, x, d) \cdot \Phi(x - lpl) dx \quad (3.2.14).$$

Тогда полный пожизненный риск смерти от радиогенных раков, в предположении, что солидные раки и лейкозы не возникают совместно, что является маловероятным событием, будет равен:

$$P_2 = P_{2s} + P_{2l} \quad (3.2.15).$$

Для оценки функции выживаемости среди населения России используем возрастные показатели смертности от всех причин, представляемых официальной медицинской статистикой. Как правило, эти показатели приводятся в пятилетних возрастных интервалах. Для удобства аналитических расчетов воспользуемся аппроксимацией зависимости показателей смертности (все причины) от возраста. Зависимость показателя смертности λ^m от возраста u хорошо аппроксимируется функцией вида (функция Гомпертца):

$$\lambda^m(u) = c_0 \cdot \exp(c_1 \cdot u) \quad (3.2.16),$$

где коэффициенты для российской популяции соответственно равны $c_0 = 1,14 \cdot 10^{-3}$, $c_1 = 6,14 \cdot 10^{-2}$ для мужчин и $c_0 = 3,16 \cdot 10^{-5}$, $c_1 = 0,10$ для женщин.

Фактические данные и аппроксимация показателя приведены на рис. 3.2.6.

Для расчета P_{2s} необходима возрастная зависимость показателя смертности от рака. Значения возрастных показателей смертности от рака приведены, например, в [Чиссов В.И. и др., 2009]. Известно, что эта зависимость достаточно хорошо описывается степенной функцией:

$$\lambda^{sp}(u) = c_2 \cdot u^{c_3} \quad (3.2.17),$$

где $c_2 = 1,03 \cdot 10^{-10}$, $c_3 = 4,43$ для мужчин и $c_2 = 1,22 \cdot 10^{-9}$, $c_3 = 3,64$ для женщин.

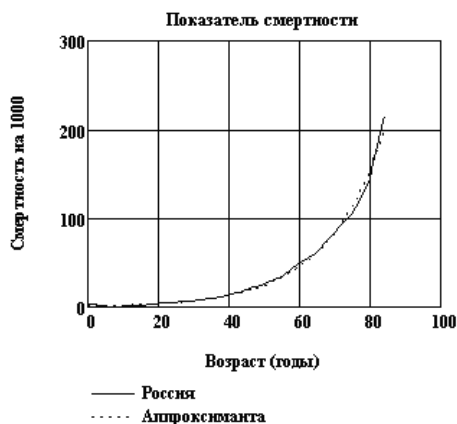


Рис. 3.2.6. Возрастная зависимость показателя смертности от всех причин (мужчины)

Фактические данные и аппроксиманта для показателей онкологической смертности представлены на рис. 3.2.7.

Приближенную функцию выживаемости для фиксированной по численности популяции с учетом аппроксимации (3.2.11), будем рассчитывать аналитически по формуле:

$$S(g, t) = \exp\left(-\int_g^t \lambda^m(x) dx\right) = \exp\left(-\frac{c_2 \cdot e^{g \cdot c_3} \cdot (e^{c_3 \cdot t} - 1)}{c_3}\right) \quad (3.2.18).$$



Рис. 3.2.7. Возрастная зависимость показателя смертности от рака (мужчины)



Рис. 3.2.8. Функция выживаемости с 18 лет (мужчины России)

Для иллюстрации на рис. 3.2.8 приведена функция выживаемости для популяции (мужчины) с возраста 18 лет.

Риск радиогенных раков состоит из двух компонент – солидные раки и лейкозы. Оценим значимость этих компонент в зависимости от возраста при облучении. На рис. 3.2.9, 3.2.10 приведен относительный вклад лейкозов и солидных раков в полный радиационный риск.

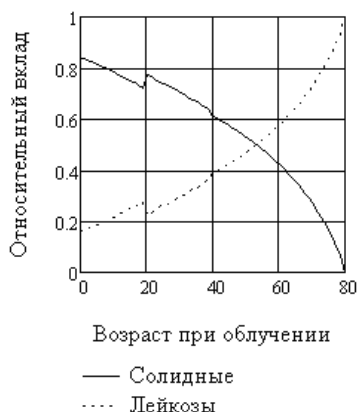


Рис. 3.2.9. Относительный вклад компонент риска в полный риск (мужчины)

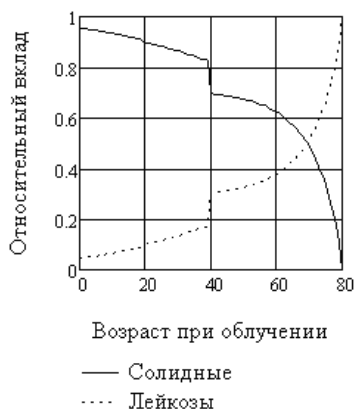


Рис. 3.2.10. Относительный вклад компонент риска в полный риск (женщины)

Как следует из рисунков, вклад компонент для мужчин одинаков при возрасте облучения 54 года (рис. 3.2.9), для женщин – в 70 лет (рис. 3.2.10).

Как уже указывалось, при оценке пожизненного риска для персонала конкретного предприятия необходимо учесть его возрастную структуру, так как риск зависит от возраста при облучении и времени после облучения (для лейкозов). Зависимость пожизненного риска P_2 на единицу дозы (1 Зв) потенциального облучения от возраста (g) при потенциальном облучении мужчин приведена на рис. 3.2.11 и на рис. 3.2.12 для женщин.



Рис. 3.2.11. Зависимость пожизненного риска смертности при облучении годовой дозой 1 Зв от возраста при облучении (мужчины)

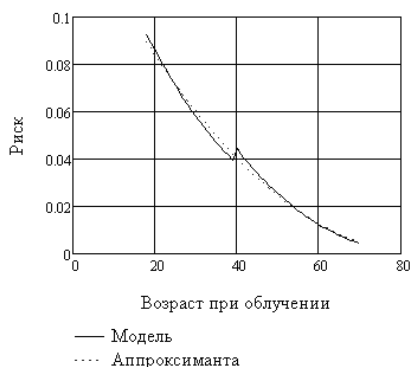


Рис. 3.2.12. Зависимость пожизненного риска смертности при облучении годовой дозой 1 Зв от возраста при облучении (женщины)

Например, для персонала (мужчины), получившего дозу облучения 1 Зв в 40 лет, оценка пожизненного риска равна $3,0 \cdot 10^{-2}$.

Зависимость риска потенциального облучения от возраста при облучении в основном определяется временем предстоящей жизни: чем больше возраст, тем меньше это время.

Пожизненный риск от возраста при облучении при годовой дозе 1 Зв потенциального облучения P_2 (рис. 3.2.11, 3.2.12), достаточно хорошо описывается аппроксимацией полиномом второй степени:

$$P_2(g) = c_3 + c_4 \cdot g + c_5 \cdot g^2 \quad (3.2.19),$$

где $c_3=8,85 \cdot 10^{-2}$, $c_4=-1,92 \cdot 10^{-3}$, $c_5=1,09 \cdot 10^{-5}$ для мужчин и $c_3=1,44 \cdot 10^{-1}$, $c_4=-3,40 \cdot 10^{-3}$, $c_5=2,02 \cdot 10^{-5}$ для женщин.

Выражение в левой части равенства (3.2.19) означает пожизненный риск смертности при облучении в дозе 1 Зв, при максимальном возрасте дожития 90 лет. Исходными данными для вывода аппроксимационных формул (3.2.19) в данной методике являлись данные о смертности от всех причин и от злокачественных новообразований, а также о

заболеваемости злокачественными новообразованиями в Российской Федерации [Чиссов В.И. и др., 2009].

Сравним значение риска, полученное для обоих полов с номинальным коэффициентом риска для взрослого населения $4,1 \cdot 10^{-2}$, приведенным в [МКРЗ, Публикация 103, 2009] для референтной популяции. Средний возраст этой популяции – 37 лет. Как следует из рис. 3.2.11 и 3.2.12, значение пожизненного риска равно $3,2 \cdot 10^{-2}$ для мужчин и $4,3 \cdot 10^{-2}$ – для женщин. Среднее значение равно 3,75, отличие составляет 10 %. Меньшее значение риска в приведенных оценках обусловлено более высокими показателями смертности (меньшей выживаемостью) в популяции России – люди умирают от других причин, не заболев и не умерев от рака, в том числе и радиогенного. Отсюда следует вывод, что модели НКДАР ООН [UNSCEAR, 2000] дают значение риска, близкого к значению, представленному МКРЗ [МКРЗ, Публикация 103, 2009].

Следует отметить, что нормативы по дозе, приведенные в рекомендациях МКРЗ [МКРЗ, Публикация 103, 2009] и НРБ-99/2009 [НРБ-99/2009, 2009], с точки зрения соответствующих величин радиационных рисков для российской популяции определены с запасом.

Ограничение обобщённого риска при потенциальном облучении (3.2.3) можно представить в виде следующего неравенства:

$$4,1 \cdot 10^{-2} \cdot K(s, g) \cdot \sum_i P(d_i) \cdot d_i \leq 2 \cdot 10^{-4} \quad (3.2.20),$$

где
$$K(s, g) = \frac{P_2(s, g)}{4,1 \cdot 10^{-2}} \quad (3.2.21).$$

В формуле (3.2.21) $P_2(s, g)$ – средний пожизненный риск смерти от радиогенных раков на единицу дозы (1 Зв) для конкретной популяции (в данном случае – для России) с учетом ее демографических особенностей.

Максимальная величина LR определяется с учетом всех вероятностей облучений $P(d_i)$ в дозах d_i :

$$LR_{\max}(s, g, \langle d \rangle) = 4,1 \cdot 10^{-2} \cdot K(s, g) \cdot \sum_i P(d_i) \cdot d_i = 4,1 \cdot 10^{-2} \cdot K(s, g) \cdot \langle d \rangle \quad (3.2.22).$$

где $\langle d \rangle = \sum_i P(d_i) \cdot d_i$ – средняя эквивалентная доза внешнего облучения.

Сделаем формулу (3.2.22) более универсальной, используя только коэффициент K для мужчин, введя коэффициент $\varepsilon(s)$ – отношение коэффициента риска среди женщин к коэффициенту риска среди мужчин. Согласно МКРЗ [МКРЗ, Публикация 103, 2009], это отношение равно 1,37. Тогда формула (3.2.22) примет вид:

$$LR_{\max}(s, g, \langle d \rangle) = 4,1 \cdot 10^{-2} \cdot K(s = m, g) \cdot \varepsilon(s) \cdot \langle d \rangle \quad (3.2.23),$$

где $\varepsilon(s=m)=1$, m – индекс мужского пола, $\varepsilon(s=f)=1,37$, f – индекс женского пола.

Подставляя (3.2.23) в неравенство (3.2.20), переходя от зиверта к миллизивертам (для удобства – дозы потенциального облучения сравнительно невелики), сокращая константы, получим неравенство:

$$F_{\max} = K(s = m, g) \cdot \langle d \rangle \leq \frac{2 \cdot 10^{-4}}{4,1 \cdot 10^{-2} \cdot \varepsilon(s)} \cdot 10^3 = A \quad (3.2.24),$$

где $A=4,88$ для мужчин и $3,56$ – для женщин.

3.3. Методика приближённого расчёта обобщённого риска потенциального облучения

Таким образом, контроль норматива по обобщённому риску потенциального облучения (ОРПО), $ОРПО \leq 2,0 \times 10^{-4}$, год⁻¹ для группы персонала осуществляется по следующим приближённым формулам.

$$ОРПО_s \approx LAR_s(g) \cdot d \leq 2,0 \times 10^{-4} \quad (3.3.1),$$

где s – пол, g – средний возраст при облучении в группе, d – средняя годовая доза в группе.

Для облученной группы лиц персонала определённого

пола, со средним возрастом g среднее значение коэффициента пожизненного риска LAR (на 1 Зв эквивалентной дозы) вычисляется по следующим аппроксимационным формулам: для мужчин

$$LAR_M(g) = 0,09 - 1,92 \cdot 10^{-3} \cdot g + 1,09 \cdot 10^{-5} \cdot g^2 \quad (3.3.2),$$

для женщин

$$LAR_{ж}(g) = 0,14 - 3,41 \cdot 10^{-3} \cdot g + 2,02 \cdot 10^{-5} \cdot g^2 \quad (3.3.3),$$

где g – средний возраст при облучении в группе, в годах.

Верхняя граница 90 % доверительного интервала LAR вычисляется по следующим аппроксимационным формулам: для мужчин

$$LAR_{M,90}(g) = 0,09 - 1,28 \cdot 10^{-3} \cdot g + 1,98 \cdot 10^{-6} \cdot g^2 \quad (3.3.4),$$

для женщин

$$LAR_{ж,90}(g) = 0,13 - 2,05 \cdot 10^{-3} \cdot g + 3,98 \cdot 10^{-6} \cdot g^2 \quad (3.3.5),$$

где g – средний возраст при облучении в группе, в годах.

Обобщённый риск потенциального облучения (ОРПО) от потенциальных источников в течение предстоящего года определяется умножением российского коэффициента пожизненного риска LAR для среднего возраста при облучении в группе на значение верхней границы 90 % доверительного интервала по распределению годовых доз d внешнего облучения в рассматриваемой группе за референсный период времени, равный 5 годам, непосредственно предшествующим году, в котором производится оценка ОРПО:

для мужчин

$$ОРПО_M = LAR_M(g) \cdot d \quad (3.3.6),$$

для женщин

$$ОРПО_{ж} = LAR_{ж}(g) \cdot d \quad (3.3.7),$$

где d – средняя годовая доза внешнего облучения в половозрастной группе за референсный (5-летний) период, в зивертах (Зв).

Аналогично, верхняя 90 % граница статистического разброса для ОРПО вычисляется по следующим приближённым формулам:

для мужчин

$$ОРПО_{м,90} = LAR_{м,90}(g) \cdot (d + 1,64 \cdot \sigma_d) \quad (3.3.8),$$

для женщин

$$ОРПО_{ж,90} = KLR_{ж,90}(g) \cdot (d + 1,64 \cdot \sigma_d) \quad (3.3.9),$$

где d – средняя годовая доза внешнего облучения в половозрастной группе за референсный (5-летний) период, в зивертах (Зв); σ_d – среднеквадратичное отклонение средней годовой дозы внешнего облучения в половозрастной группе за референсный (5-летний) период, в зивертах (Зв); σ_d вычисляется как среднеквадратичное отклонение индивидуальных годовых доз, делённое на корень квадратный из их числа.

3.4. Индекс безопасности потенциального облучения

Статистические характеристики доз облучения персонала следует рассматривать в двух аспектах: 1) годовые дозы облучения, которые регламентируются пределами и ограничениями норм радиационной безопасности; 2) накопленные за длительный период работы дозы, которые в основном определяют величины текущих и нижние границы пожизненных атрибутивных рисков стохастических эффектов. Второй аспект наиболее важен при разработке планов оптимизации радиологической защиты, в частности при учёте в процессе планирования потенциального облучения на конкретном предприятии.

С увеличением стажа работ на ИДК индивидуальные риски от накопленной дозы облучения увеличиваются, по крайней мере, до достигнутого возраста 55-60 лет. При этом основной предел облучения характеризуется в настоящее время накопленной за 50 лет дозой 1 Зв [НРБ-99/2009, 2009], что соответствует риску от накопленной дозы 0,042, или среднему годовому риску от накопленной дозы

$(0,042/50 \text{ лет}) \approx 10^{-3}/\text{год}$.

В соответствии с принципом оптимизации ОРПО должен поддерживаться на возможно низком и достижимом уровне при условии одновременного соблюдения ограничения ОРПО и индивидуальных пределов облучения.

Текущий годовой риск от накопленной дозы $R(D)$ должен уменьшать правую часть неравенства (3.3.1), делая неравенство более жестким относительно потенциального облучения. Представим учет текущего годового риска от накопленной дозы $R(D)$ в виде сомножителя q к величине $2 \cdot 10^{-4}$: $q = 1 - R(D)/(10^{-3}/\text{год})$. Величина $10^{-3}/\text{год}$ взята как среднегодовой для персонала предел риска.

В процессе оптимизации радиационной защиты одновременное соблюдение ограничения $\text{ОРПО} < 2 \cdot 10^{-4}/\text{год}$ и предела индивидуального риска r персонала от накопленной дозы (для всех лиц из рассматриваемой группы персонала $r < 10^{-3}/\text{год}$) контролируется с помощью Индекса безопасности потенциального облучения (ИБПО):

$$\text{ИБПО} = 100 \% \cdot 1 / (1 + \text{ОРПО} / (2 \cdot 10^{-4} \cdot q)) \quad (3.4.1),$$

где $q = 1 - R/10^{-3}$ при $R < 10^{-3}$, $q = 0$ при $R \geq 10^{-3}$,

$$R = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n r_i,$$

где $r_i < 10^{-3}/\text{год}$ – индивидуальный риск i -го лица из персонала от накопленной дозы, n – число лиц в группе.

Текущий индивидуальный риск r_i от накопленной дозы для каждого i -го лица из рассматриваемой группы персонала АЭС численности n может быть вычислен по технологии АРМИР [Иванов В.К. и др., 2012].

Величина q в формуле (3.4.1) для группы персонала представляет долю среднего риска, оставшуюся до достижения этой группой предельного среднего риска от накопленной дозы. В отсутствие у персонала предыстории облучения, когда $R=0$, т.е. $q=1$, ограничение $\text{ОРПО} < 2 \cdot 10^{-4}/\text{год}$ эквивалентно тому, что $\text{ИБПО} > 50 \%$. По мере приближения к основному пределу ($r_i = 10^{-3}/\text{год}$ для каждого i -го лица из рассматриваемой группы), величина q уменьшается.

Составляя часть основного предела облучения, ограничение по источникам потенциального облучения усиливается пропорционально достижению основного предела: ИБПО > 50 % теперь эквивалентно ограничению ОРПО < $(2 \cdot 10^{-4} \cdot q)$, где $1 \leq q < 0$. При достижении основного предела риска $r = 10^{-3}$ /год для всех лиц из группы, т.е. $q = 0$, дальнейшее потенциальное облучение должно быть исключено, это соответствует значениям ИБПО = 0.

Основными величинами, на основании которых рассчитывается ИБПО, являются:

- идентификатор индивидуума;
- пол индивидуума;
- режим облучения в виде набора связанных пар значений: возраст, в котором получена доза облучения (число полных лет) и эквивалентная доза внешнего облучения (в Зв);
- возраст, для которого ведется расчет риска (число полных лет);
- текущий индивидуальный риск r_i от накопленной дозы для каждого i -го лица из рассматриваемой группы персонала численности n , рассчитанный по технологии «АРМИР» [Иванов В.К. и др., 2012];
- группа лиц персонала, состоящего на индивидуальном дозиметрическом контроле, для которой будет вычисляться ОРПО и ИБПО, отдельно для мужчин и женщин;
- средний возраст (в годах) g , для выбранной половозрастной группы за референсный 5-летний период, непосредственно предшествующий году, в котором производится оценка ОРПО и ИБПО;
- средняя годовая доза внешнего облучения для выбранной половозрастной группы за референсный 5-летний период, непосредственно предшествующий году, в котором производится оценка ОРПО и ИБПО, в зивертах (Зв);
- среднеквадратичное отклонение средней годовой дозы внешнего облучения для выбранной половозрастной группы за тот же референсный 5-летний период, в зивертах (Зв).

Выделение критических групп персонала

Поскольку и вероятность смерти, связанной с облучением, и вероятность облучения связаны с величиной дозы, возрастом, полом персонала, а также со стажем на ИДК, реализация принципа ограничения обобщённого риска потенциального облучения для критических групп персонала является не тривиальной практической задачей.

Ниже на примере ОАО «Концерн Росэнергоатом» рассматривается разбиение персонала по половозрастным группам, а также разбиение по стажу и полу.

В табл. 3.4.1 представлено разбиение ИБПО и ОРПО для ОАО «Концерн Росэнергоатом» на 2011 г. по половозрастным группам. Наименьшее значение ИБПО наблюдается для возрастной группы до 25 лет, как по мужчинам (72 %), так и по женщинам (84 %). Это, прежде всего, связано с более высоким пожизненным риском здоровью от потенциальных облучений для молодых возрастов.

В табл. 3.4.2 представлено разбиение ИБПО и ОРПО для ОАО «Концерн Росэнергоатом» на 2011 г. в группах по полу и стажу. Наименьшее значение ИБПО наблюдается для группы по стажу более 30 лет для мужчин (56 %) и для группы по стажу менее 10 лет для женщин (84 %). Для мужского персонала снижение ИБПО при увеличении стажа работ на ИДК в данном случае обусловлено слишком быстрым ростом со стажем риска от накопленной за предыдущий период работы дозы, который не компенсируется снижением с возрастом пожизненного риска от потенциальных облучений. Для женского персонала снижение ИБПО в группе со стажем работ на ИДК менее 10 лет в данном случае обусловлено молодым средним возрастом в этой группе.

Значение ИБПО уменьшается при увеличении ОРПО и риска от накопленной дозы. Однако с увеличением продолжительности работы на ИДК и с увеличением достигнутого

возраста ОРПО и риск от накопленной дозы меняются разномановлено: ОРПО (как правило) уменьшается, а риск от накопленной дозы увеличивается, поэтому изменение ИБПО со средним возрастом или средним стажем ИДК в группе персонала зависит от всей предыстории облучения персонала рассматриваемого конкретного объекта.

На рис. 3.4.1–3.4.3 представлены зависимости ОРПО, риска от накопленной дозы и ИБПО для персонала ОАО «Концерн Росэнергосатом», в зависимости от возраста персонала в 2011 г.

На рис. 3.4.4–3.4.6 представлены зависимости ОРПО, риска от накопленной дозы и ИБПО для персонала ОАО «Концерн Росэнергосатом» в целом, в зависимости от стажа персонала на ИДК в 2011 г.

В среднем для всего персонала ОАО «Концерн Росэнергосатом», состоявшего на ИДК в 2011 г., ИБПО составляет 74 % для мужчин и 85 % – для женщин, что означает соблюдение ограничений п. 2.3 НРБ99/2009 [НРБ99/2009, 2009].

Наименьшее значение ИБПО наблюдается для мужчин возрастной группы до 25 лет (72 %) и для мужчин со стажем работ на ИДК более 30 лет (56 %). Для всех рассмотренных групп женского персонала значения ИБПО находятся выше 80 %.

Таким образом, критическими группами персонала ОАО «Концерн Росэнергосатом», состоявшего на ИДК в 2011 г., следует считать мужчин в возрасте до 25 лет (ИБПО=72 %), а также мужчин со стажем работ на ИДК более 30 лет (ИБПО=56 %).

Процедура оценки ОРПО предназначена, прежде всего, для контроля соответствия ограничению ОРПО, п. 2.3 НРБ-99/2009, $2 \cdot 10^{-4}$ /год, для критических групп персонала, т.е. при соблюдении Принципа 6 «Ограничение рисков в отношении физических лиц» серии норм МАГАТЭ 2007 г. № SF-1 «Основополагающие принципы безопасности. Основы безопасности» [МАГАТЭ, 2007].

Таблица 3.4.2.
ОАО «Концерн Росэнергоатом» в целом. 2011 г. ИБПО в группах по стажу

Стаж	Мужчины						Женщины					
	Число чел.-лет	Сред. возраст, лет	Ср. доза в отчёт. году, мЗв (верх. гр.)	Сред. годовой риск от накопленной дозы	ИБПО, %	Нижняя 90 %-ная доверительная граница ИБПО, %	Число чел.-лет	Сред. возраст, лет	Ср. доза в отчёт. году, мЗв (верх. гр.)	Сред. годовой риск от накопленной дозы	ИБПО, %	Нижняя 90 %-ная доверительная граница ИБПО, %
до 10 лет	49621	34	1,85	2,37E-06	75	69	7973	39	0,9	3,15E-07	84	80
10-20 лет	20936	42	2,5	6,42E-05	74	66	3651	48	1,05	4,54E-05	87	81
20-30 лет	17242	49	2,44	0,000308	73	64	3146	52	1,15	0,000198	87	80
30-40 лет	5923	56	2,14	0,000796	56	44	458	58	0,85	0,000391	91	85
ВСЕ	93772	38	2,04	8,76E-05	74	67	15228	43	0,96	4,52E-05	85	80

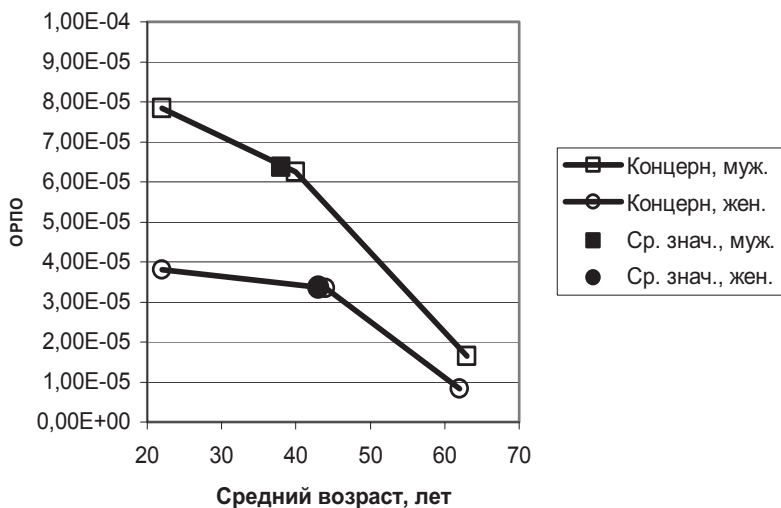


Рис. 3.4.1. Обобщённый риск потенциального облучения (ОРПО) для персонала ОАО «Концерн Росэнергоатом» в целом, в зависимости от возраста персонала в 2011 г.

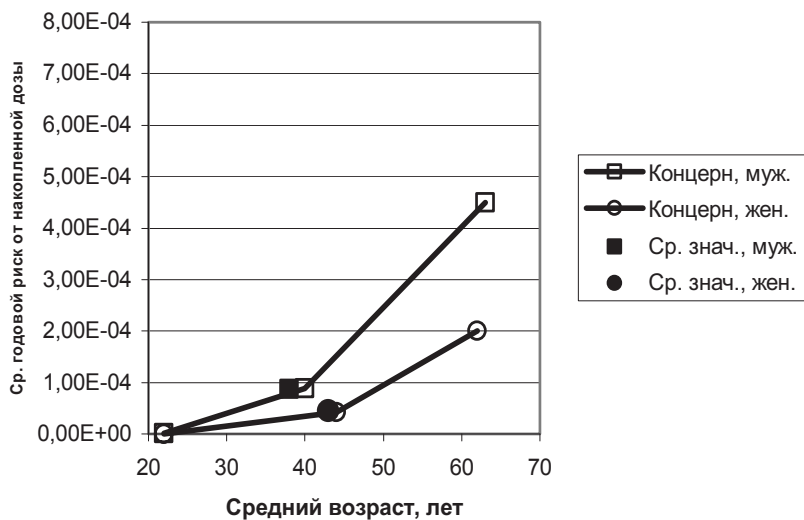


Рис. 3.4.2. Средний годовой риск от накопленной дозы для персонала ОАО «Концерн Росэнергоатом» в целом, в зависимости от возраста персонала в 2011 г.

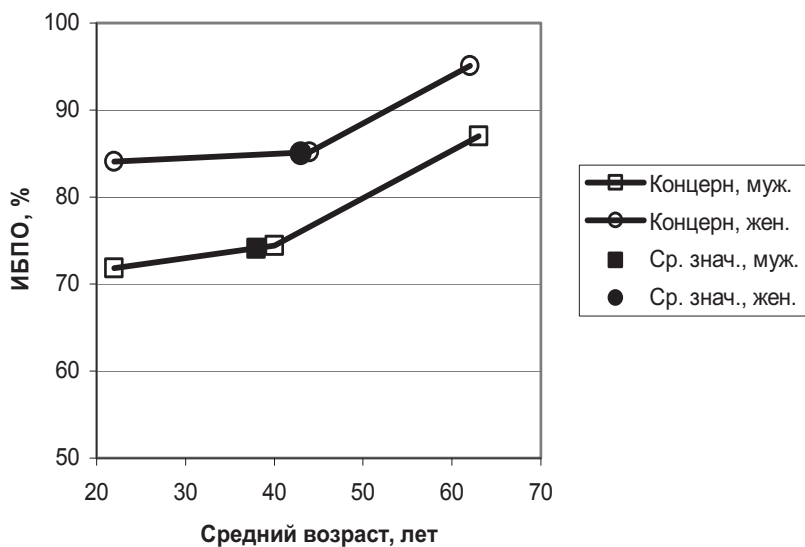


Рис. 3.4.3. Индекс безопасности потенциального облучения (ИБПО) для персонала ОАО «Концерн Росэнергоатом» в целом, в зависимости от возраста персонала в 2011 г.

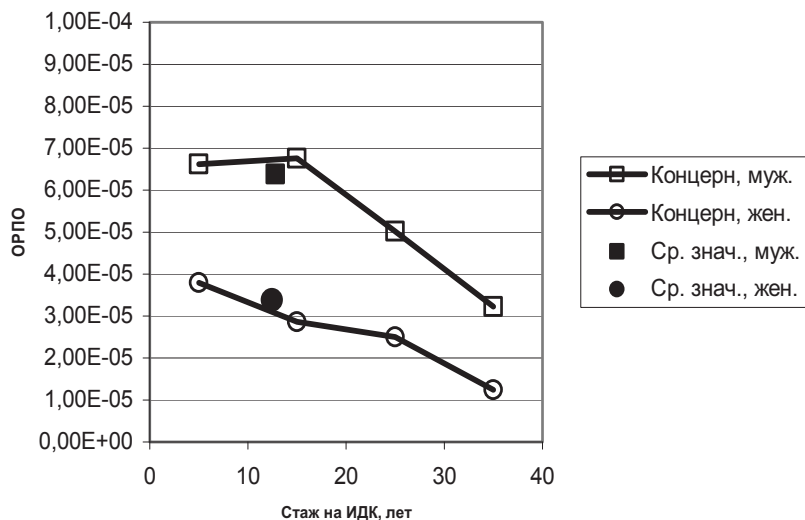


Рис. 3.4.4. Обобщённый риск потенциального облучения (ОРПО) для персонала ОАО «Концерн Росэнергоатом» в целом, в зависимости от стажа персонала на ИДК в 2011 г.

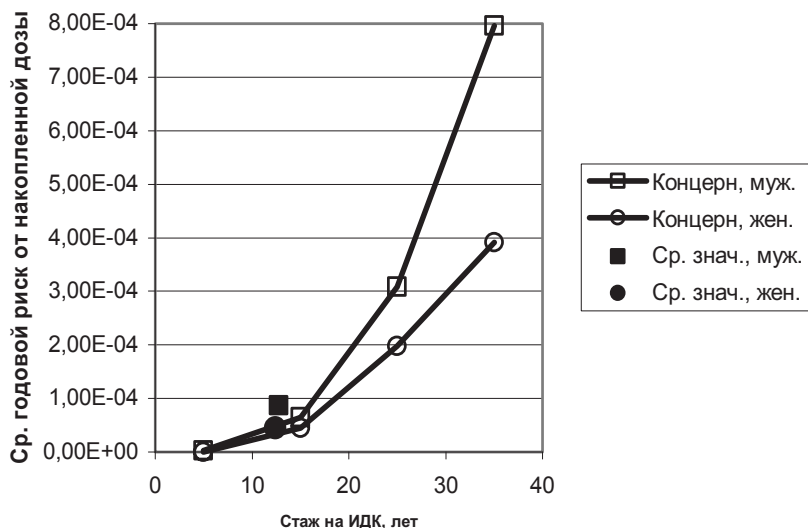


Рис. 3.4.5. Средний годовой риск от накопленной дозы для персонала ОАО «Концерн Росэнергоатом» в целом, в зависимости от стажа персонала на ИДК в 2011 г.

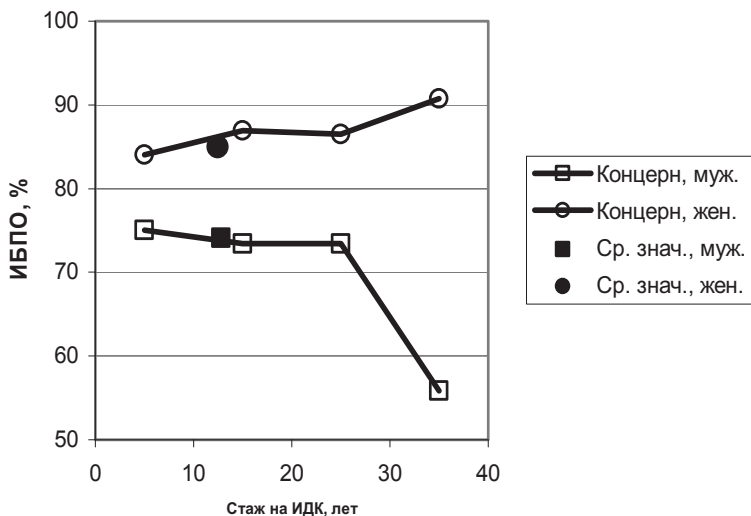


Рис. 3.4.6. Индекс безопасности потенциального облучения (ИБПО) для персонала ОАО «Концерн Росэнергоатом» в целом, в зависимости от стажа персонала на ИДК в 2011 г.

Оценка ОРПО включает оценку среднего значения ОРПО и статистических пределов варьирования ОРПО, по данным ИДК персонала АЭС за 5 последних лет. Оценка ОРПО используется в дальнейшем для оценки ИБПО.

Процедура оценки ИБПО используется при планировании и оптимизации защиты от источников потенциального облучения. Индекс безопасности потенциального облучения (ИБПО) количественно (в %) выражает степень соответствия ограничению ОРПО по потенциальному облучению и основному пределу облучения для лиц из персонала группы А, с учётом текущего риска от накопленной дозы ([НРБ99/2009, 2009], пп. 2.3, 3.1).

ИБПО является целевым показателем безопасности по потенциальному облучению в планах оптимизации радиационной защиты персонала в рамках конкретного предприятия (АЭС). ИБПО определяется для персонала, состоящего на ИДК в том году, в котором определяется ИБПО. Целью безопасности на последующие годы является увеличение значений ИБПО для АЭС от 50 % до значений, превышающих 80 %.

Оценка ИБПО включает:

- оценку среднего значения ИБПО и статистических пределов варьирования ИБПО, по данным ИДК персонала АЭС за 5 последних лет, с использованием индивидуальных годовых абсолютных рисков, рассчитанных по технологии АРМИР-АЭС версии 5 (риски от накопленных к текущему году доз);
- оценку теоретически возможных максимумов $ИБПО_{\text{макс}}$ и минимумов $ИБПО_{\text{мин}}$ для АЭС за 5 последних лет, при имевшихся на АЭС половозрастных распределениях персонала и распределениях индивидуальных доз. Оценки $ИБПО_{\text{макс}}$ и $ИБПО_{\text{мин}}$ получаются за счёт возможных перераспределений фактически имевшихся индивидуальных доз по возрастным группам персонала, при сохранении фактически имевшейся средней годовой индивидуальной дозы по АЭС.

3.5. Оптимизации радиологической защиты персонала на основе ИБПО

В новой серии норм МАГАТЭ, в документе «Основополагающие принципы безопасности» [МАГАТЭ, 2007] сформулирован Принцип 6 «Ограничение рисков в отношении физических лиц»: «Обоснование и оптимизация защиты сами по себе не гарантируют, что ни одно физическое лицо не будет подвергаться неприемлемому риску нанесения вреда» (п. 3.25); «пределы дозы и пределы риска представляют собой юридическую верхнюю границу приемлемости, их одних недостаточно для обеспечения наилучшей возможной защиты... Таким образом, для достижения желательного уровня безопасности необходимы оптимизация защиты и ограничение доз и рисков в отношении физических лиц» (п. 3.26).

В ситуации потенциального облучения вероятность события, приводящего к облучению в определённом интервале доз, может быть оценена на основе обобщения имеющейся информации об облучении в нормальной контролируемой ситуации [МКРЗ, Публикация 103, 2009], однако такое обобщение с приемлемой статистической точностью может быть сделано только для группы лиц, а не для отдельного физического лица. Таким образом, Принцип 6 ОПБ МАГАТЭ [МАГАТЭ, 2007] для потенциального облучения является принципом ограничения рисков в отношении критических групп лиц.

В соответствии с этим принципом ограничения НРБ-99/2009 [НРБ-99/2009, 2009] по потенциальному облучению должны быть отнесены к критическим группам персонала.

ОРПО и ИБПО определяется для группы лиц, отдельно для мужчин и женщин в следующих возрастных группах: (1) 18-25 лет, (2) 25-60 лет, (3) старше 60 лет. ОРПО может определяться также в других возрастных группах, но диапазон возрастов в группе не должен быть менее 5 лет.

ОРПО и ИБПО определяется для группы лиц, отдельно для мужчин и женщин в следующих группах по стажу работ на ИДК: (1) до 10 лет, (2) 10-20 лет, (3) 20-30 лет, (4) более 30 лет.

Группы лиц персонала из выше перечисленных, имеющие минимальные значения ИБПО, являются критическими группами.

Если для критических групп персонала значения ИБПО < 80 % (не являются оптимизированными), необходимо рассмотреть возможности по увеличению ИБПО для этих групп в будущем (провести оптимизацию радиационной защиты по потенциальному облучению).

Показателем оптимизации радиационной защиты является ИБПО. В процессе оптимизации должно планироваться увеличение значений ИБПО на последующие годы, по сравнению с его текущим значением. Текущее значение ИБПО < 50 % считается безусловно не оптимизированным. Текущее значение ИБПО > 80 % в настоящее время считается безусловно оптимизированным.

Плановое увеличение ИБПО может достигаться за счёт:

а) возможных перераспределений доз по половозрастным группам персонала, при сохранении текущей средней годовой индивидуальной дозы по предприятию; при этом интервал возможных изменений ИБПО – от ИБПО_{мин} до ИБПО_{макс} – зависит от демографического состава персонала и истории его облучения и является характеристикой как текущего состава персонала, так и конкретного предприятия;

б) снижения индивидуальных доз облучения;

в) привлечение нового персонала с малыми накопленными дозами.

Значение ИБПО должно контролироваться при плановом изменении половозрастного состава персонала.

Теоретические примеры планирования и оптимизации

Пример 1. Расчёт достижимых величин ИБПО_{мин} и ИБПО_{макс}.

В табл. 3.5.1 показаны значения и минимального и максимального ИБПО (ИБП_{мин}=63,1 % и ИБПО_{макс}=68,6 %) для одной и той же группы лиц персонала мужского пола, которые определяются различными распределениями инди-

видуальных годовых доз облучения.

В данном примере годовые дозы облучения достаточно малы, так что при любом распределении индивидуальных доз ИБПО > 50 % и не попадает в область безусловно не оптимизированных значений. С другой стороны, из-за высоких значений риска от накопленной дозы для данного персонала достичь значений ИБПО > 68,6 %, чтобы приблизиться к цели ИБПО = 80 %, невозможно. Для увеличения ИБПО свыше текущего значения ИБПО_{макс} требуется привлечение нового персонала с малыми накопленными дозами.

Таблица 3.5.1.

Значения и минимального и максимального ИБПО (ИБПО_{мин} и ИБПО_{макс}) для одной и той же группы лиц персонала мужского пола; значения ИБПО зависят от распределения индивидуальных годовых доз облучения

Возраст	Число лиц	Возраст, лет	Годовой риск от накопленной дозы	Доза, мЗв/год	ИБПО, %
18-24	1	20	6,0E-06	2,00	
25-59	1	42	2,0E-05	1,50	
25-59	1	42	6,0E-04	2,00	
60+	1	65	9,0E-04	1,00	
Итого, ИБПО _{мин}					63,1
18-24	1	20	6,0E-06	1,00	
25-59	1	42	2,0E-05	2,00	
25-59	1	42	6,0E-04	1,50	
60+	1	65	9,0E-04	2,00	
Итого, ИБПО _{макс}					68,6

Пример 2. Перераспределение доз по половозрастным группам персонала.

Индивидуальные радиационные риски от годового облучения уменьшаются с увеличением возраста при облучении. На рис. 3.5.1 показано, что при одной и той же средней годовой

дозе перераспределение доз по возрастным группам меняет величину ОРПО. В данном примере близкое к граничному значению $ОРПО=1,88 \cdot 10^{-4}$ соответствует облучению в одной и той же дозе 5 мЗв/год всех членов группы персонала (сплошные круги на рисунке). Увеличение доз для старших возрастов и снижение для младших (крестики на рисунке) даёт уменьшение $ОРПО=1,48 \cdot 10^{-4}$, а обратное перераспределение (окружности на рисунке) – превышение граничного риска, $ОРПО=2,14 \cdot 10^{-4}$.

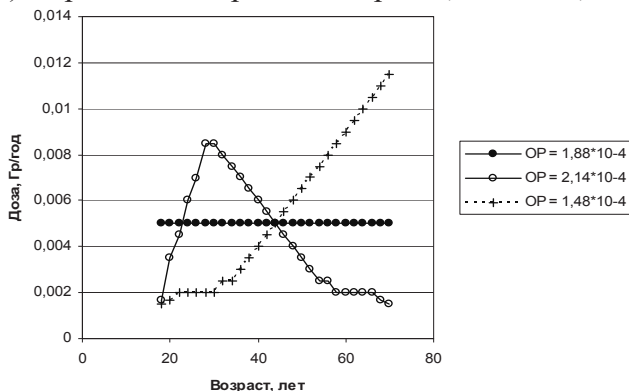


Рис. 3.5.1. Изменение ОРПО в зависимости от перераспределения доз по возрастным группам, при одном и том же возрастном распределении мужского персонала (со средним возрастом 43 года) и средней дозе 5 мЗв/год

Пример 3. Снижение индивидуальных доз.

Таблица 3.5.2.

Увеличение ИБПО для заданного возрастного распределения мужского персонала при снижении средней дозы с 2,9 мЗв/год до 2,65 мЗв/год

Возраст, лет	Доля лиц, %	Средний возраст, лет	Средняя доза, мЗв/год	Средняя доза, мЗв/год
18-30	23	26	2.74	2.50
30-40	24	35	2.89	2.64
40-50	28	46	3.13	2.86
50-60	23	55	2.88	2.63
60-70	2	64	2.10	1.92
ВСЕ	100	41	2.90	2.65
ИБПО			71.6 %	73.4 %

Пример 4. Смещение вероятности облучения в сторону высоких доз, при сохранении величины ОРПО.

При облучении в условиях нормальной эксплуатации вероятность облучения с увеличением дозы падает. На рис. 3.5.2 сплошными линиями (обозначения с индексом 1) показаны реальные распределения удельных значений ОРПО/мЗв для мужской и женской групп персонала ОАО «Концерн Росэнергоатом» возраста 18-24 года при облучении. Средние значения ОРПО равны площадям под соответствующими кривыми на рисунке, $\text{ОРПО}=8,8 \cdot 10^{-5}$ для мужчин и $\text{ОРПО}=4,4 \cdot 10^{-5}$ для женщин. Если возникает необходимость увеличить число лиц, облучённых в более высоких дозах, это можно сделать, сохраняя среднее значение ОРПО. При сохранении средних величин ОРПО возможно смещение вероятности облучения в сторону высоких доз, как показано на рис. 3.5.2 пунктирными кривыми (с индексом 2). Соответствующие распределения доз показаны на рис. 3.5.3.

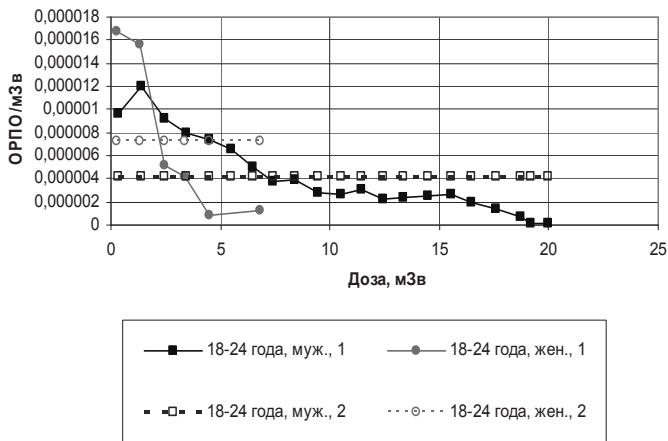


Рис. 3.5.2. Возможное смещение вероятности облучения в сторону высоких доз для возрастной группы 18-24 года персонала ОАО «Концерн Росэнергоатом», при сохранении средних величин ОРПО: $8,8 \cdot 10^{-5}$ для мужчин и $4,4 \cdot 10^{-5}$ для женщин; индекс 1 – для реального распределения ОРПО по дозам в 2011 г., индекс 2 – для гипотетического смещения распределения в сторону высоких доз, в случае необходимости

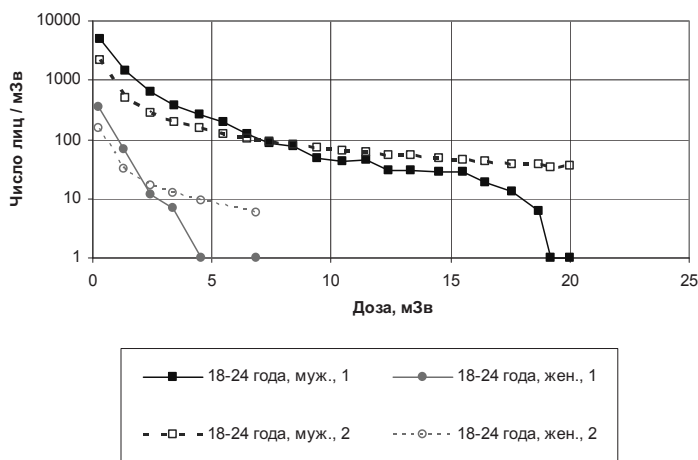


Рис. 3.5.3. Возможное смещение вероятности облучения в сторону высоких доз для возрастной группы 18-24 года персонала ОАО «Концерн Росэнергоатом», при сохранении средних величин ОРПО: $8,8 \cdot 10^{-5}$ для мужчин и $4,4 \cdot 10^{-5}$ для женщин; индекс 1 – для реального распределения доз в 2011 г., индекс 2 – для гипотетического смещения распределения в сторону высоких доз, в случае необходимости

Приведённые примеры планирования радиационной защиты с учётом обобщённых рисков потенциального облучения показывают, что для планирования на основе конкретных данных по предприятию требуется применение специализированного программного обеспечения.

ГЛАВА 4

РАДИАЦИОННЫЙ РИСК МЕДИЦИНСКОГО И ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБЛУЧЕНИЯ

4.1. Оценка радиационного риска при однократном медицинском облучении

В связи с динамичными условиями развития ядерных радиационных технологий и их применением в гражданских целях большое значение приобретает вопрос необходимости наличия научно-обоснованных оценок её безопасности. При этом возникает естественный вопрос о радиационном риске и радиологической защите при одновременном воздействии профессионального и медицинского облучения.

В Международных основных нормах безопасности, выпущенных МАГАТЭ в 2011 г. [IAEA, 2011], отмечается (п. 3.150), что «ни один пациент... не подвергается медицинскому облучению, если... он не информирован... о рисках, связанных с воздействием излучения». Это требование также отражено в принятых в России Нормах радиационной безопасности (НРБ-99/2009) [НРБ-99/2009, 2009] и в Основных санитарных правилах обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010), где подчеркивается (п. 4.17), что «...рентгенорадиологические диагностические или лечебные процедуры, связанные с облучением пациентов, проводятся только по назначению лечащего врача и с согласия пациента, которому предварительно разъясняют пользу от предложенной процедуры и связанный с ней риск для здоровья. Окончательное решение о проведении соответствующей процедуры принимает врач» [ОСПОРБ-99/2010, 2010]. Таким образом, впервые на международном и национальном уровнях чётко обозначено требование оценки рис-

ка возможных стохастических эффектов при планировании медицинского рентгенорадиологического облучения.

Если вопрос о пользе рентгенорадиологических процедур лежит, главным образом, в плоскости клинической радиологии и социально-экономических проблем, то вопрос об оценке риска возможных отдаленных неблагоприятных медицинских последствий (в частности – онкологических заболеваний) должен быть отнесен к современным возможностям радиационной эпидемиологии.

Методика оценки рисков после однократного и многократного облучений

Как уже отмечалось ранее, основным неблагоприятным фактором воздействия радиации на здоровье человека является, как известно, увеличение вероятности или риска возникновения онкологического заболевания. В отсутствие облучения основным показателем риска является показатель фоновой или спонтанной онкологической смертности или заболеваемости λ_0 (число онкологической смертности или заболеваемости в год, обычно приведённое на 100 тыс. человек). Воздействие радиации приводит к увеличению λ_0 на некоторую дополнительную величину $\delta\lambda$. Таким образом, полный показатель смертности или заболеваемости раком λ будет суммой фонового и радиационно обусловленного показателей:

$$\lambda = \lambda_0 + \delta\lambda.$$

Фоновые показатели смертности и заболеваемости раком локализации l в общем случае зависят от возраста a , пола s и календарного времени t : т.е. $\lambda_0 = \lambda_0(a, l, s, t)$, а радиационная добавка – от дозы облучения D , текущего возраста a , локализации l , пола s и возраста на момент облучения g : $\delta\lambda = \delta\lambda(g, a, l, s, D)$. Поэтому:

$$\lambda(g, a, l, s, D, t) = \lambda_0(a, l, s, t) + \delta\lambda(g, a, l, s, D).$$

Радиогенный риск $\delta\lambda$ представляется в двух формах: аддитивной и мультипликативной. В аддитивной модели полный риск есть:

$$\lambda = \lambda_0 + 10^5 \cdot EAR \quad (4.1.1),$$

где EAR – избыточный абсолютный риск (Excess Absolute Risk), обусловленный только радиационным облучением.

В мультипликативной модели полный риск записывается в виде:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot (1 + ERR) \quad (4.1.2),$$

где безразмерная величина ERR есть избыточный относительный риск (Excess Relative Risk) или отношение избыточного абсолютного риска к фоновому показателю:

$$ERR = \frac{10^5 \cdot EAR}{\lambda_0} \quad (4.1.3).$$

После облучения радиационный риск – как EAR , так и ERR – может реализоваться только через определённое время – латентный период T_L .

Международная организация МКРЗ определяет методику вычисления риска как в форме ERR , так и в форме EAR . Итоговый же риск возникновения онкологической заболеваемости определяется как взвешенное среднее между этими составляющими общей модели. Причём вес мультипликативной и аддитивной составляющих зависит от локализации опухоли. Такой подход применяется для переноса модели рисков на популяции, отличные от той, по которой идентифицировалась модель. Итоговое выражение для абсолютного избыточного риска заболеваемости раком выглядит следующим образом:

$$EAR = p \cdot ERR^{mult} \cdot \lambda_0 + (1 - p) \cdot EAR^{add}$$

или по-другому, с учетом (4.1.3):

$$EAR = p \cdot EAR^{mult} + (1 - p) \cdot EAR^{add} \quad (4.1.4).$$

Здесь p – весовой множитель, зависящий от локализации опухоли.

Модель МКРЗ [ICRP, 2007a] для оценки рисков забо-

леваемости солидными раками является моделью D.L. Preston [Preston et al., 2007]. Мультипликативная и аддитивная модели в работе [Preston et al., 2007] даётся в форме $p(D) \cdot \varepsilon(g, s, a)$, где $p(D)$ описывает вид дозовой зависимости, а $\varepsilon(g, s, a)$ описывает изменение риска в зависимости от пола s , возраста при облучении g , а так же достигнутого возраста a . В МКРЗ принята линейная зависимость «доза-эффект» для риска развития солидных раков, а значит – для солидных раков: $p(D) = \beta \cdot D$.

Формула на с. 6 в [Preston et al., 2007] даёт вид $\varepsilon(g, s, a)$:

$$\varepsilon(g, s, a) = \theta_s \cdot \exp[\alpha \cdot g + \omega \cdot \ln(a)].$$

Отсюда следует, что в рамках модели МКРЗ избыточный риск от однократного облучения $ER_{\text{однокр.}}$, как абсолютный, так и относительный, можно получить из общей формулы:

$$ER_{\text{однокр.}}(g, s, a, D) = \beta \cdot \theta_s \cdot D \cdot \exp[\alpha \cdot g + \omega \cdot \ln(a)] \quad (4.1.5).$$

В [ICRP, 2007a] для величины избыточного абсолютного риска произведение $\beta \cdot \theta_s$ даётся в форме избытка раковой заболеваемости на 10 тыс. человек в год на Гр в возрасте 70 лет при облучении в 30 лет. Учитывая это, а также то, что величины β и α зависят от локализации опухоли, получим, исходя из (4.1.5), выражение для абсолютного избыточного риска от однократного облучения, соответствующего аддитивной составляющей модели МКРЗ:

$$EAR_{\text{однокр. sol}}^{\text{add}}(g, a, l, s, D) = D \cdot \frac{\beta_{\text{add}}(l, s)}{10^4} \cdot \left(\frac{a}{70}\right)^{\omega_{\text{add}}(l)} \cdot \exp[\alpha_{\text{add}}(l) \cdot (g - 30)] \quad (4.1.6).$$

(Здесь и далее под обозначением $EAR_{\text{однокр.}}$ имеется в виду риск EAR от однократного облучения.)

Аналогично избыточному абсолютному риску, для избыточного относительного риска в [ICRP, 2007a] произведение $\beta \cdot \theta_s$ даётся в форме ERR на Гр в возрасте 70 лет при облучении в 30 лет. Учитывая это, а также формулу (4.1.3) и то, что величины β и α зависят от локализации опухоли, по-

лучаем, исходя из (4.1.5), выражение для абсолютного избыточного риска соответствующего мультипликативной составляющей модели МКРЗ:

$$EAR_{\text{однокр.сол}}^{\text{mult}}(g, a, l, s, D) = \frac{\lambda_0^{\text{inc}}(a, l, s)}{10^5} \cdot D \cdot \beta_{\text{mult}}(l, s) \cdot \left(\frac{a}{70}\right)^{\omega_{\text{mult}}(l)} \cdot \exp[\alpha_{\text{mult}}(l) \cdot (g - 30)] \quad (4.1.7).$$

В формулах (4.1.6) и (4.1.7): l – локализация опухоли; s – пол; g – возраст при облучении; a – достигнутый возраст; D – доза облучения; β_{mult} , ω_{mult} , α_{mult} – параметры мультипликативной модели; β_{add} , ω_{add} , α_{add} – параметры аддитивной модели. Также в формулах (4.1.6) и (4.1.7) параметры β равны соответствующему произведению $\beta \cdot \theta_s$ в формуле (4.1.5) и зависят от пола и локализации опухоли. Остальные параметры зависят только от локализации.

В [ICRP, 2007a] параметры α_{mult} и α_{add} непосредственно не приводятся. Однако там приведены величины, которые мы обозначим как γ_{mult} и γ_{add} . Эти параметры даются в виде процента изменения $ER_{\text{однокр.}}$ (как для мультипликативной модели, так и для аддитивной модели) при увеличении возраста при облучении на десятилетие. Исходя из этого и вида формул (4.1.6) и (4.1.7), параметры α_{mult} и α_{add} можно вычислить по следующим формулам:

$$\alpha_{\text{mult}}(l) = \frac{1}{10} \cdot \ln \left(1 + \frac{\gamma_{\text{mult}}(l)}{100} \right);$$

$$\alpha_{\text{add}}(l) = \frac{1}{10} \cdot \ln \left(1 + \frac{\gamma_{\text{add}}(l)}{100} \right).$$

Параметры β_{mult} , ω_{mult} , γ_{mult} , β_{add} , ω_{add} , γ_{add} также можно найти ниже в табл. 4.1.1.

Латентный период для солидных раков в модели МКРЗ T_{LS} равен 10 годам. То есть, в течение 10 лет после облучения избыточные риски, как по мультипликативной, так и по аддитивной моделям, принимаются равными нулю.

Другими словами:

$$EAR_{\text{однокр.сол}}^{\text{mult}}(g, a, l, s, D) = 0$$

и $EAR_{\text{однокр.сол}}^{\text{add}}(g, a, l, s, D) = 0$, если $a < g + T_{LS}$.

Таблица 4.1.1.

Параметры модели риска заболеваемости от различных локализаций солидного рака для модели МКРЗ-2007

Локализация опухоли	Пол	β_{mult}	γ_{mult}	ω_{mult}	β_{add}	γ_{add}	ω_{add}
Все солидные	Муж.	0,35	-17	-1,65	43,20	-24	2,38
	Жен.	0,58			59,83		
Пищевод	Муж.	0,40	-17	-1,65	0,48	64	2,38
	Жен.	0,65			0,66		
Желудок	Муж.	0,23	-17	-1,65	6,63	-24	2,38
	Жен.	0,38			9,18		
Толстая кишка	Муж.	0,68	-17	-1,65	5,76	-24	2,38
	Жен.	0,33			2,40		
Печень	Муж.	0,25	-17	-1,65	4,18	-24	2,38
	Жен.	0,40			1,30		
Лёгкое	Муж.	0,29	+17	-1,65	6,47	1	4,25
	Жен.	1,36			8,97		
Молочная железа	Жен.	0,87	0	-2,26	10,9	-39	3,5
Яичник	Жен.	0,32	-17	-1,65	1,47	-24	2,38
Мочевой пузырь	Муж.	0,67	-17	-1,65	2,00	-11	6,39
	Жен.	1,10			2,77		
Щитовидная железа	Муж.	0,53	-56	0,00	0,69	-24	0,01
	Жен.	1,05			2,33		
Остальные солидные	Муж.	0,22	-34	-1,65	7,55	-24	2,38
	Жен.	0,17			10,45		

Полный риск возникновения солидного типа рака локализации l после однократного облучения с учётом (4.1.4):

$$\begin{aligned}
 &EAR_{\text{однокр.сол}}(g, a, l, s, D) = \\
 &= p(l) \cdot EAR_{\text{однокр.сол}}^{\text{mult}}(g, a, l, s, D) + (1 - p(l)) \cdot EAR_{\text{однокр.сол}}^{\text{add}}(g, a, l, s, D)
 \end{aligned}$$

Здесь p – весовой множитель. В [IAEA, 2011] сказано, что параметр p равен 0 для молочной железы и костного мозга, равен 1 для щитовидной железы и кожи, равен 0,3 для лёгкого и равен 0,5 для всех остальных локализаций.

Модель МКРЗ для оценки рисков заболеваемости лейкозами является моделью D.L. Preston [Preston et al., 1994]. Особенностью данной модели является линейно-квадратичная дозовая зависимость, а также используется только аддитивный способ вычисления риска. Окончательная формула для вычисления избыточного абсолютного риска заболеваемости лейкозами после однократного облучения выглядит так:

$$EAR_{\text{однокр. lkm}}(g, a, s, D) = \frac{\beta_{lkm}(g, s)}{10^5} \cdot D \cdot (1 + 0,79 \cdot D) \cdot \exp[\alpha_{lkm}(g, s) \cdot (a - g - 25)].$$

Здесь так же, как и в случае с риском для солидных типов рака, g – возраст при облучении; a – возраст, на который рассчитывается риск; D – доза однократного облучения; β_{lkm} , α_{lkm} – параметры модели избыточного абсолютно риска заболеваемости лейкозами;

Параметры β_{lkm} , α_{lkm} представлены в табл. 4.1.2.

Латентный период для заболеваемости лейкозами T_{LL} равен 2 года, и:

$$EAR_{\text{однокр. lkm}}(g, a, s, D) = 0, \text{ если } a < g + T_{LL}.$$

Таблица 4.1.2.

Параметры модели для вычисления избыточного абсолютного риска заболеваемости лейкозами после однократного облучения

Возраст	β_{lkm}		α_{lkm}	
	Мужчины	Женщины	Мужчины	Женщины
0-19 лет	3,3	6,6	-0,17	-0,07
20-39 лет	4,8	9,7	-0,13	-0,03
> 40 лет	13,1	26,4	-0,07	0,03

В итоге можно записать общее выражение для вычисления избыточного абсолютного риска заболеваемости раком различных локализаций:

$$EAR_{однокр.}(g, a, l, s, D) = \begin{cases} EAR_{однокр. sol}(g, a, l, s, D), & \text{для } l = \text{солидная локализация опухоли} \\ EAR_{однокр.}^{lkm}(g, a, s, D), & \text{для } l = \text{лейкоз} \end{cases} \quad (4.1.8).$$

Здесь l – обозначает одну из солидных локализаций опухоли из табл. 4.1.1 или лейкоз.

Зная величину избыточного абсолютного риска заболеваемости раком после однократного облучения, можно определить избыточный абсолютный риск заболеваемости раком после многократных облучений (далее в тексте обозначен как EAR) путём суммирования $EAR_{однокр.}$ по возрастам на момент облучения с соответствующей дозой облучения. Формула для определения избыточного абсолютного риска пролонгированного облучения выглядит так:

$$EAR(a, l, s, \{D_g\}) = \sum_{g=0}^a EAR_{однокр.}(g, a, l, s, D_g) \quad (4.1.9).$$

Здесь $\{D_g\}$ – массив, содержащий дозу облучения D_g для каждого возраста g ; D_g – доза однократного облучения в возрасте g .

Далее, зная избыточный абсолютный риск, можно вычислить атрибутивную долю, т.е. вклад радиационно-обусловленной заболеваемости в общую фоновую заболеваемость в %. Эта величина определяется по следующей формуле:

$$ARF(a, l, s, \{D_g\}) = 100 \cdot \frac{EAR(a, l, s, \{D_g\})}{EAR(a, l, s, \{D_g\}) + \frac{\lambda_0^{inc}(l, s, a)}{10^5}} \quad (4.1.10).$$

Зная избыточный абсолютный риск для каждого предстоящего года жизни, можно оценить пожизненный атрибутивный риск (lifetime attributable risk – LAR) возникновения

рака заданной локализации. Пожизненный атрибутивный риск характеризует количество избыточных над фоновым числом раковых заболеваний, которые могут произойти в течение всей последующей жизни после облучения группы лиц, у которых одинаковы модифицирующие риск факторы (пол, возраст при облучении и др.). Для индивидуума пожизненный атрибутивный риск можно понимать как вероятность возникновения у него онкологического заболевания, вызванного радиационным облучением. Величина LAR рассчитывается суммированием значений избыточного абсолютного риска по всем последующим возрастам, начиная от текущего.

Кроме того, для прогнозирования радиационных рисков у человека на будущий возраст a следует учесть вероятность того, что этот человек достигнет, оставаясь здоровым, возраста a . Эту вероятность обозначим как S и в дальнейшем будем называть функцией здорового дожития. Вероятность S зависит от нескольких параметров: $S = S(e, a, l, s)$. Здесь e – текущий возраст человека, в котором он жив и не болен раком локализации l , a – возраст, на который вычисляется риск, l – локализация опухоли, s – пол. При этом в возрасте e и ранее, естественно, функция здорового дожития по определению принимается равным единице, то есть $S(e, a, l, s) = 1$, $a \leq e$.

При вычислении функции здорового дожития должны учитываться показатели смертности от всех причин плюс показатели заболеваемости злокачественными новообразованиями, за вычетом смертности от злокачественных новообразований (случаи смерти учитываются в заболеваемости). В этом случае $S(e, a, l, s)$ можно определить следующим образом:

$$S(e, a, l, s) = \exp \left[-10^{-5} \cdot \sum_{k=e}^{a-1} \lambda_0^{totmort}(k, s) + \lambda_0^{inc}(k, l, s) - \lambda_0^{mort}(k, l, s) \right]$$

$$a > e$$

(4.1.11),

где $\lambda_0^{totmort}(a, s)$ – количество смертей от всех причин в возрасте от a до $a+1$ на 100 тыс. человек в год; $\lambda_0^{mort}(a, l, s)$ – количество смертей от рака локализации l в возрасте от a до $a+1$ на 100 тыс. человек в год; $\lambda_0^{inc}(a, l, s)$ – количество случаев заболевания раком локализации l в возрасте от a до $a+1$ на 100 тыс. человек в год.

Из (4.1.11) видно, что $S(e, a, l, s)$ также может быть найдена, используя следующую формулу:

$$S(e, a, l, s) = \frac{S(0, a, l, s)}{S(0, e, l, s)}.$$

$$a > e$$

Таким образом, итоговая формула для вычисления пожизненного атрибутивного риска (LAR) записывается следующим образом:

$$LAR(e, l, s, \{D_g\}) = \frac{1}{DDREF} \cdot \sum_{a=e}^{a_{\max}} [S(e, a, l, s) \cdot EAR(a, l, s, \{D_g\})] \quad (4.1.12).$$

Здесь $DDREF$ – коэффициент эффективности дозы и мощности дозы, учитывающий уменьшение риска в случае хронического облучения или облучения в малой дозе. При вычислении риска заболеваемости солидными типами рака МКРЗ рекомендует значение $DDREF$ брать равное 2, а лейкозами – 1; $a_{\max}$ – максимальный возраст дожития, обычно выбирается от 85 до 120 лет.

Очевидно, что, если массив $\{D_g\}$ будет содержать единственную ненулевую дозу в каком-либо возрасте g , то по формуле (4.1.12) можно рассчитать LAR от однократного облучения в возрасте g . Однако для вычисления риска от однократного облучения можно воспользоваться более прозрачной формулой:

$$LAR_{\text{однокр.}}(g, e, l, s, D) = \frac{1}{DDREF} \cdot \sum_{a=e}^{a_{\max}} [S(e, a, l, s) \cdot EAR_{\text{однокр.}}(g, a, l, s, D)] \quad (4.1.13).$$

Здесь g – возраст на момент облучения, D – однократная доза, полученная в этом возрасте.

Зная пожизненный атрибутивный риск, можно определить среднюю пожизненную атрибутивную долю (lifetime attributable risk fraction – $LARF$). Эта величина показывает долю (или %) радиационно обусловленной заболеваемости раком в течение всей оставшейся жизни после многократного облучения. Формулы для вычисления $LARF$ для рака заданной локализации l выглядят так:

$$LARF(e, l, s, \{D_g\}) = \frac{LAR(g, e, l, s, \{D_g\})}{LAR(g, e, l, s, \{D_g\}) + LBR(e, l, s)} \cdot 100\% \quad (4.1.14).$$

Или для однократного облучения:

$$LARF_{однокр.}(g, e, l, s, D) = \frac{LAR_{однокр.}(g, e, l, s, D)}{LAR_{однокр.}(g, e, l, s, D) + LBR(e, l, s)} \cdot 100\% \quad (4.1.15).$$

Здесь LBR – величина пожизненного фонового риска заболеваемости раком различных локализаций, рассчитанного от возраста e . Эта величина показывает ожидаемое число раковых заболеваний, которые могут произойти в течение всей оставшейся жизни у группы лиц, начиная с возраста e , в случае отсутствия облучения этой группы, у членов которой одинаковые факторы (пол, возраст e и др.). Для индивидуума пожизненный фоновый риск можно понимать как вероятность возникновения у него онкологического заболевания, несвязанного с радиационным облучением. Этот риск вычисляется по следующей формуле:

$$LBR(e, l, s) = 10^{-5} \cdot \sum_{a=e}^{a_{\max}} \lambda_0^{inc}(a, l, s) \cdot S(e, a, l, s) \quad (4.1.16).$$

Формулы (4.1.8)–(4.1.10) и (4.1.12)–(4.1.16) определяют современные величины риска.

Рассмотренные выше величины риска соответствуют рискам заболеваемости раком. Риски же смертности получают путём умножения соответствующих рисков по заболе-

ваемости на коэффициент летальности. Кроме того, в формулах (4.1.12) и (4.1.13) и (4.1.16) вместо функции здорового дожития должна применяться просто функция дожития:

$$S(e, a, s) = \exp \left[-10^{-5} \cdot \sum_{k=e}^{a-1} \lambda_0^{totmort}(k, s) \right].$$

$$a > e$$

Коэффициент летальности k можно получить путём усреднения по возрасту в популяции отношения показателя смертности к показателю заболеваемости для данного пола и локализации опухоли:

$$k(l, s) = \sum_{a=1}^{a_{\max}} \left(\frac{N(s, a)}{T(s)} \cdot \frac{\lambda_0^{mort}(a, l, s)}{\lambda_0^{inc}(a, l, s)} \right).$$

Здесь $N(s, a)$ – число людей пола s и возраста a ; $T(s)$ – общее число людей в популяции пола s .

**Универсальные эпидемиологические таблицы
для расчета радиационного риска при однократном
облучении в малых дозах**

За последние 20-30 лет выполнен большой объем научных исследований, ориентированных по оценке рисков стохастических эффектов после радиационного воздействия при разных дозах облучения [UNSCEAR, 2000; BEIR, 2005; ICRP, 2007a]. В Публикации 103 МКРЗ (п. А4 – Риски радиационно-индуцированного рака) даны итоговые значения номинальных рисков, усредненных по полу и возрасту [ICRP, 2007a]. Эти данные основаны на результатах многолетних эпидемиологических исследований в Хиросиме и Нагасаки [Preston et al., 2007]. Наряду с этим, учитывались и важные эпидемиологические данные о медицинских последствиях аварии на Чернобыльской АЭС [Ivanov, 2007]. Все эти данные были положены в основу создания технологий оценки индивидуальных (индивидуализированных) ра-

диационных рисков, рассмотренных ранее в Главе 1.

Целью настоящего раздела являются разработка универсальных эпидемиологических таблиц оценки радиационных рисков с учетом индивидуальных характеристик (пол, возраст, локализация рака, доза облучения и т.д.) и применение этой технологии для оптимизации радиационной защиты при медицинском облучении.

Для расчёта пожизненных атрибутивных рисков по модели МКРЗ была разработана специальная компьютерная программа RRME (Radiation Risk Medical Exposure). При помощи этой программы были получены табл. 4.1.3–4.1.6, в которых указаны пожизненные атрибутивные риски заболеваемости и смертности для мужчин и женщин различных возрастов при облучении дозой 1 мГр. В расчёте использовались фоновые показатели заболеваемости и смертности усреднённой европейско-американской и азиатской популяций. Так как в МКРЗ 2007 [ICRP, 2007a] используется линейная зависимость «доза-эффект» для риска рака, то, используя табл. 4.1.3–4.1.6, можно без труда рассчитать пожизненный атрибутивный риск заболеваемости или смертности от рака при однократном облучении в любой необходимой дозе для усреднённой европейско-американской и азиатской популяций. Для этого необходимо умножить пожизненный атрибутивный риск из табл. 4.1.3–4.1.6 на нужную дозу облучения, выраженную в мГр.

Чтобы иметь возможность рассчитать для указанной популяции пожизненную атрибутивную долю, при помощи разработанной программы также были созданы табл. 4.1.7–4.1.10, в которых указаны пожизненные фоновые риски заболеваемости и смертности для мужчин и женщин различных возрастов при облучении. Используя эти таблицы и таблицы с пожизненными атрибутивными рисками, а также формулу для $LARF$ (4.1.15), можно легко рассчитать пожизненную атрибутивную долю заболеваемости или смертности от рака нужной локализации у мужчин или женщин при облучении дозой радиации в определённом возрасте.

Таблица 4.1.3.

Пожизненный атрибутивный риск заболеваемости раком различной локализации LAR^{inc} для мужчин, приведённый на 10000 человек после облучения в дозе 1 мГр в различных возрастах

Воз- раст	Локализация рака								
	все солид- ные раки	пищевод	желудок	толстая кишка	печень	лёгкое	молочная железа	мочевой пузырь	щитовид- ная железа
0-4	1,2381	2,200E-02	0,1577	0,2082	9,843E-02	7,782E-02	0	9,060E-02	4,527E-02
5-9	1,0974	2,047E-02	0,1398	0,1865	8,711E-02	8,017E-02	0	8,348E-02	2,991E-02
10-14	0,9683	1,909E-02	0,1232	0,1662	7,667E-02	8,234E-02	0	7,653E-02	1,951E-02
15-19	0,8523	1,793E-02	0,1082	0,1477	6,723E-02	8,462E-02	0	7,010E-02	1,260E-02
20-24	0,7478	1,699E-02	9,456E-02	0,1308	5,869E-02	8,699E-02	0	6,423E-02	8,058E-03
25-29	0,6523	1,625E-02	8,203E-02	0,1153	5,078E-02	8,926E-02	0	5,874E-02	5,115E-03
30-34	0,5638	1,562E-02	7,034E-02	0,1007	4,334E-02	9,112E-02	0	5,346E-02	3,197E-03
35-39	0,4812	1,503E-02	5,948E-02	8,684E-02	3,638E-02	9,225E-02	0	4,832E-02	1,950E-03
40-44	0,4032	1,440E-02	4,942E-02	7,354E-02	2,991E-02	9,214E-02	0	4,310E-02	1,157E-03
45-49	0,3285	1,365E-02	4,003E-02	6,051E-02	2,384E-02	9,001E-02	0	3,763E-02	6,749E-04
50-54	0,2556	1,268E-02	3,114E-02	4,748E-02	1,796E-02	8,468E-02	0	3,175E-02	3,805E-04
55-59	0,1861	1,146E-02	2,286E-02	3,493E-02	1,258E-02	7,490E-02	0	2,533E-02	2,000E-04
60-64	0,1249	9,922E-03	1,556E-02	2,384E-02	8,207E-03	6,091E-02	0	1,878E-02	9,496E-05
65-69	7,582E-02	8,003E-03	9,585E-03	1,472E-02	4,914E-03	4,446E-02	0	1,264E-02	4,067E-05
70-74	3,983E-02	5,668E-03	5,089E-03	7,756E-03	2,552E-03	2,763E-02	0	7,270E-03	1,499E-05
75-80	1,350E-02	2,609E-03	1,741E-03	2,628E-03	8,488E-04	1,087E-02	0	2,734E-03	3,564E-06

Таблица 4.1.4.

Пожизненный атрибутивный риск заболеваемости раком различной локализации LAR^{inc} для женщин, приведённый на 10000 человек после облучения в дозе 1 мГр в различных возрастах

Воз- раст	Локализация рака								
	все солид- ные раки	пищевод	желудок	толстая кишка	печень	лёгкое	молочная железа	мочевой пузырь	щитовид- ная железа
0-4	1,9224	1,502E-02	0,2194	9,227E-02	4,507E-02	0,1484	0,6870	7,206E-02	0,2781
5-9	1,7004	1,428E-02	0,1933	8,236E-02	4,007E-02	0,1535	0,5384	6,699E-02	0,1835
10-14	1,4980	1,369E-02	0,1693	7,318E-02	3,550E-02	0,1584	0,4202	6,202E-02	0,1191
15-19	1,3134	1,331E-02	0,1476	6,485E-02	3,138E-02	0,1634	0,3272	5,738E-02	7,602E-02
20-24	1,1434	1,316E-02	0,1278	5,724E-02	2,765E-02	0,1685	0,2540	5,308E-02	4,785E-02
25-29	0,9851	1,326E-02	0,1096	5,025E-02	2,422E-02	0,1735	0,1962	4,907E-02	2,966E-02
30-34	0,8370	1,357E-02	9,290E-02	4,374E-02	2,106E-02	0,1776	0,1505	4,523E-02	1,801E-02
35-39	0,6993	1,407E-02	7,780E-02	3,764E-02	1,816E-02	0,1799	0,1143	4,149E-02	1,057E-02
40-44	0,5732	1,471E-02	6,429E-02	3,186E-02	1,545E-02	0,1796	8,562E-02	3,769E-02	6,016E-03
45-49	0,4596	1,534E-02	5,207E-02	2,630E-02	1,286E-02	0,1752	6,301E-02	3,372E-02	3,369E-03
50-54	0,3570	1,576E-02	4,096E-02	2,093E-02	1,028E-02	0,1650	4,518E-02	2,949E-02	1,843E-03
55-59	0,2649	1,582E-02	3,091E-02	1,590E-02	7,676E-03	0,1472	3,118E-02	2,493E-02	9,666E-04
60-64	0,1844	1,521E-02	2,195E-02	1,130E-02	5,304E-03	0,1215	2,036E-02	2,000E-02	4,727E-04
65-69	0,1169	1,354E-02	1,423E-02	7,247E-03	3,347E-03	8,960E-02	1,221E-02	1,480E-02	2,072E-04
70-74	6,347E-02	1,043E-02	7,869E-03	3,953E-03	1,789E-03	5,611E-02	6,276E-03	9,458E-03	7,885E-05
75-80	2,178E-02	5,087E-03	2,717E-03	1,355E-03	5,907E-04	2,217E-02	2,036E-03	3,767E-03	1,943E-05

Таблица 4.1.5.

Пожизненный атрибутивный риск смертности от рака различной локализации LAR^{mont} для мужчин, приведённый на 10000 человек после облучения в дозе 1 мГр в различных возрастах

Воз- раст	Локализация рака								
	все солид- ные раки	пищевод	желудок	толстая кишка	печень	лёгкое	молочная железа	мочевой пузырь	щитовид- ная железа
0-4	0,6555	1,964E-02	8,162E-02	0,1118	8,634E-02	6,849E-02	0	3,452E-02	9,053E-03
5-9	0,5809	1,828E-02	7,235E-02	0,1002	7,642E-02	7,056E-02	0	3,180E-02	5,981E-03
10-14	0,5126	1,704E-02	6,374E-02	8,925E-02	6,725E-02	7,247E-02	0	2,916E-02	3,903E-03
15-19	0,4512	1,601E-02	5,597E-02	7,933E-02	5,897E-02	7,448E-02	0	2,671E-02	2,520E-03
20-24	0,3959	1,517E-02	4,893E-02	7,027E-02	5,148E-02	7,657E-02	0	2,447E-02	1,612E-03
25-29	0,3453	1,451E-02	4,245E-02	6,190E-02	4,454E-02	7,856E-02	0	2,238E-02	1,023E-03
30-34	0,2985	1,395E-02	3,640E-02	5,409E-02	3,802E-02	8,020E-02	0	2,037E-02	6,393E-04
35-39	0,2547	1,342E-02	3,078E-02	4,664E-02	3,191E-02	8,119E-02	0	1,841E-02	3,899E-04
40-44	0,2135	1,286E-02	2,557E-02	3,949E-02	2,624E-02	8,110E-02	0	1,642E-02	2,315E-04
45-49	0,1739	1,219E-02	2,071E-02	3,250E-02	2,091E-02	7,922E-02	0	1,434E-02	1,350E-04
50-54	0,1353	1,133E-02	1,611E-02	2,550E-02	1,576E-02	7,453E-02	0	1,210E-02	7,611E-05
55-59	9,851E-02	1,023E-02	1,183E-02	1,876E-02	1,103E-02	6,592E-02	0	9,649E-03	4,000E-05
60-64	6,610E-02	8,859E-03	8,054E-03	1,280E-02	7,199E-03	5,361E-02	0	7,154E-03	1,899E-05
65-69	4,014E-02	7,146E-03	4,960E-03	7,906E-03	4,310E-03	3,913E-02	0	4,816E-03	8,134E-06
70-74	2,108E-02	5,061E-03	2,633E-03	4,165E-03	2,238E-03	2,432E-02	0	2,769E-03	2,998E-06
75-80	7,148E-03	2,330E-03	9,011E-04	1,411E-03	7,446E-04	9,564E-03	0	1,042E-03	7,127E-07

Таблица 4.1.6.

Пожизненный атрибутивный риск смертности от рака различной локализации LAR^{mont} для женщин, приведённый на 10000 человек после облучения в дозе 1 мГр в различных возрастах

Воз- раст	Локализация рака								
	все солид- ные раки	пищевод	желудок	толстая кишка	печень	лёгкое	молочная железа	мочевой пузырь	щитовид- ная железа
0-4	0,8681	1,462E-02	0,1519	4,650E-02	4,165E-02	0,1457	0,3092	2,030E-02	5,562E-02
5-9	0,7679	1,389E-02	0,1338	4,151E-02	3,703E-02	0,1507	0,2423	1,887E-02	3,670E-02
10-14	0,6765	1,332E-02	0,1172	3,688E-02	3,281E-02	0,1555	0,1891	1,748E-02	2,381E-02
15-19	0,5931	1,295E-02	0,1022	3,268E-02	2,900E-02	0,1604	0,1473	1,617E-02	1,520E-02
20-24	0,5164	1,280E-02	8,846E-02	2,885E-02	2,555E-02	0,1655	0,1143	1,496E-02	9,569E-03
25-29	0,4449	1,290E-02	7,585E-02	2,532E-02	2,238E-02	0,1703	8,831E-02	1,383E-02	5,931E-03
30-34	0,3780	1,320E-02	6,430E-02	2,204E-02	1,946E-02	0,1743	6,772E-02	1,274E-02	3,603E-03
35-39	0,3158	1,369E-02	5,385E-02	1,897E-02	1,678E-02	0,1766	5,142E-02	1,169E-02	2,115E-03
40-44	0,2589	1,432E-02	4,449E-02	1,606E-02	1,427E-02	0,1763	3,853E-02	1,062E-02	1,203E-03
45-49	0,2075	1,493E-02	3,604E-02	1,325E-02	1,189E-02	0,1720	2,836E-02	9,501E-03	6,739E-04
50-54	0,1612	1,533E-02	2,835E-02	1,055E-02	9,502E-03	0,1620	2,033E-02	8,310E-03	3,685E-04
55-59	0,1196	1,539E-02	2,139E-02	8,015E-03	7,094E-03	0,1445	1,403E-02	7,024E-03	1,933E-04
60-64	8,330E-02	1,480E-02	1,519E-02	5,693E-03	4,901E-03	0,1193	9,164E-03	5,637E-03	9,454E-05
65-69	5,278E-02	1,318E-02	9,850E-03	3,652E-03	3,093E-03	8,796E-02	5,493E-03	4,169E-03	4,145E-05
70-74	2,866E-02	1,015E-02	5,446E-03	1,992E-03	1,653E-03	5,508E-02	2,825E-03	2,665E-03	1,577E-05
75-80	9,836E-03	4,949E-03	1,880E-03	6,831E-04	5,459E-04	2,176E-02	9,161E-04	1,061E-03	3,886E-06

Таблица 4.1.7.
Пожизненный фоновый риск заболеваемости раком различной локализации LBR^{inc}
 для мужчин, приведённый на 10000 человек

Воз- раст	Локализация рака								
	все солид- ные раки	пищевод	желудок	толстая кишка	печень	лёгкое	молочная железа	мочевой пузырь	щитовид- ная железа
0-4	3574,54	116,90	491,78	376,96	247,97	724,34	0	247,59	17,09
5-9	3587,62	117,47	494,15	378,79	248,94	727,84	0	248,77	17,17
10-14	3589,02	117,62	494,75	379,25	249,16	728,73	0	249,07	17,14
15-19	3591,65	117,82	495,55	379,86	249,50	729,94	0	249,48	17,01
20-24	3597,35	118,16	496,87	380,87	250,12	732,01	0	250,12	16,76
25-29	3603,30	118,58	498,35	381,99	250,74	734,58	0	250,85	16,34
30-34	3607,58	119,05	499,61	382,90	251,16	737,39	0	251,58	15,77
35-39	3609,47	119,54	500,04	383,52	250,79	740,39	0	252,28	15,12
40-44	3605,76	119,81	498,60	383,52	248,66	742,88	0	252,76	14,29
45-49	3590,67	119,38	494,70	381,73	244,14	743,72	0	252,71	13,21
50-54	3552,78	117,41	487,14	376,74	236,50	740,11	0	251,07	11,93
55-59	3472,52	112,96	473,25	365,81	223,38	727,12	0	246,59	10,66
60-64	3318,85	105,08	448,95	345,29	199,34	696,95	0	237,85	9,33
65-69	3058,09	93,70	410,66	313,91	165,17	636,07	0	221,70	7,78
70-74	2682,70	78,48	358,37	274,08	130,08	540,32	0	196,93	6,07
75-80	2186,80	58,54	291,77	224,28	97,33	415,47	0	161,99	4,40

Таблица 4.1.8.
Пожизненный фоновый риск заболеваемости раком различной локализации LBR^{inc}
для женщин, приведённый на 10000 человек

Воз- раст	Локализация рака								
	все солид- ные раки	пищевод	желудок	толстая кишка	печень	лёгкое	молочная железа	мочевой пузырь	щитовид- ная железа
0-4	2895,76	50,63	260,92	324,19	117,35	356,39	717,97	81,64	53,01
5-9	2903,18	50,83	261,95	325,47	117,68	357,79	720,81	81,92	53,19
10-14	2902,87	50,88	262,17	325,74	117,74	358,10	721,44	81,99	53,08
15-19	2902,01	50,92	262,37	325,96	117,80	358,39	722,08	82,06	52,62
20-24	2900,47	50,98	262,57	326,25	117,89	358,81	722,83	82,13	51,47
25-29	2895,26	51,05	262,56	326,45	117,99	359,22	722,68	82,18	49,56
30-34	2882,46	51,12	261,77	326,44	118,05	359,56	718,91	82,23	47,04
35-39	2856,30	51,21	259,56	325,97	117,95	359,65	706,66	82,23	44,00
40-44	2809,33	51,28	255,65	324,62	117,65	358,71	679,92	82,13	40,35
45-49	2734,00	51,24	250,51	321,77	117,08	355,54	634,10	81,81	35,82
50-54	2624,97	50,98	244,68	316,02	115,86	348,41	571,56	80,86	30,90
55-59	2479,03	49,96	236,75	305,39	113,21	335,06	501,63	78,84	26,34
60-64	2287,53	47,59	225,36	287,86	107,15	312,16	428,16	75,39	22,09
65-69	2041,29	43,85	208,97	263,07	95,55	276,59	352,47	70,01	18,00
70-74	1736,92	38,20	185,47	229,31	80,08	226,52	279,14	62,07	13,93
75-80	1358,34	29,75	152,94	183,36	62,16	162,20	203,82	50,83	9,79

Таблица 4.1.9.
Пожизненный фоновый риск смертности от рака различной локализации LBR^{port}
 для мужчин, приведённый на 10000 человек

Воз- раст	Локализация рака								
	все солид- ные раки	пищевод	желудок	толстая кишка	печень	лёгкое	молочная железа	мочевой пузырь	щитовид- ная железа
0-4	2049,67	114,69	241,01	156,14	169,37	601,07	0	67,19	0
5-9	2058,71	115,25	242,18	156,90	170,14	603,98	0	67,51	0
10-14	2060,44	115,39	242,48	157,09	170,32	604,73	0	67,59	0
15-19	2063,02	115,59	242,89	157,35	170,57	605,75	0	67,70	0
20-24	2067,87	115,92	243,56	157,76	170,98	607,49	0	67,90	0
25-29	2073,69	116,34	244,35	158,24	171,38	609,64	0	68,15	0
30-34	2079,43	116,81	245,11	158,70	171,51	612,00	0	68,44	0
35-39	2084,49	117,34	245,77	159,09	171,01	614,57	0	68,80	0
40-44	2086,89	117,77	246,11	159,34	169,18	616,97	0	69,25	0
45-49	2083,39	117,75	245,86	159,29	165,51	618,16	0	69,84	0
50-54	2068,76	116,76	244,67	158,62	159,99	615,96	0	70,47	0
55-59	2034,25	114,20	241,63	156,68	151,96	606,68	0	71,07	0
60-64	1963,99	109,22	234,68	152,44	138,79	583,45	0	71,54	0
65-69	1838,94	100,88	221,61	145,08	119,88	536,35	0	71,42	0
70-74	1650,41	88,36	200,56	133,86	98,50	461,04	0	70,02	0
75-80	1379,63	70,71	167,71	116,62	74,88	356,54	0	65,69	0

Таблица 4.1.10.
Пожизненный фоновый риск смертности от рака различной локализации LBR^{port}
 для женщин, приведённый на 10000 человек

Воз- раст	Локализация рака								
	все солид- ные раки	пищевод	желудок	толстая кишка	печень	лёгкое	молочная железа	мочевой пузырь	щитовид- ная железа
0-4	1452,06	46,79	128,33	143,53	81,71	294,41	194,45	26,73	0
5-9	1457,05	46,97	128,84	144,10	82,00	295,57	195,22	26,84	0
10-14	1457,64	47,01	128,95	144,23	82,06	295,83	195,39	26,86	0
15-19	1458,23	47,05	129,05	144,35	82,11	296,09	195,56	26,88	0
20-24	1459,16	47,11	129,17	144,50	82,16	296,45	195,80	26,91	0
25-29	1459,83	47,18	129,22	144,64	82,20	296,85	195,95	26,96	0
30-34	1459,08	47,26	129,06	144,71	82,18	297,24	195,58	27,00	0
35-39	1455,25	47,36	128,56	144,62	82,05	297,45	193,88	27,05	0
40-44	1445,86	47,45	127,56	144,26	81,66	297,03	189,88	27,12	0
45-49	1427,60	47,45	126,10	143,46	80,85	295,19	182,78	27,20	0
50-54	1396,53	47,24	124,28	141,88	79,49	290,56	172,18	27,26	0
55-59	1346,86	46,59	121,60	138,94	77,18	280,94	158,52	27,26	0
60-64	1271,26	45,20	117,35	133,86	73,00	263,15	143,09	27,12	0
65-69	1161,89	42,65	110,72	126,11	66,18	233,85	126,47	26,64	0
70-74	1012,67	38,31	100,31	114,75	56,54	192,32	108,71	25,42	0
75-80	810,33	31,15	83,67	97,27	43,46	139,30	88,42	22,90	0

Пример оценки радиологических рисков однократного облучения пациентов при компьютерной томографии

Рассмотрим решение задачи оценки радиологических рисков компьютерной томографии (КТ) с использованием описанной выше технологии и эпидемиологических табл. 4.1.3–4.1.10.

В последние 20 лет отмечается быстрый рост количества медицинских радиологических процедур, которые являются основным источником воздействия ионизирующего излучения на человека. Так, за жизнь одного поколения в США средняя эффективная доза медицинского облучения увеличилась на 600 % и в 2006 г. составила 3,0 мЗв, эта величина сравнима с эффективной дозой, которую ежегодно получает человек от естественного излучения [Schauer, Linton, 2009]. Приблизительно половину средней эффективной дозы от всех видов медицинских радиологических процедур больные получают при проведении КТ [El-Maraghi, Kielar, 2009; Frauenfelder et al., 2009; Ohashi, El-Khoury, 2009].

Благодаря техническим достижениям в области медицинской радиологии, в частности повышению качества диагностического изображения и снижению времени проведения обследования, количество проводимых КТ-процедур в мире постоянно увеличивается. Однако в связи с ежегодным ростом числа сканирований, выполняемых во всем мире, вклад КТ в общую среднюю дозу также увеличивается.

При компьютерной томографии одной из самых уязвимых групп являются дети. В ранних исследованиях было обнаружено, что дети более, чем взрослые, чувствительны к онкогенному действию ионизирующего излучения, которое повышает риск развития острой лейкемии и солидного рака [Wakeford, 2004]. Поскольку размер тела и масса ребенка меньше, эффективные дозы облучения у детей почти на 50 % выше доз у взрослых [Huda, 2002]. У детей также выше пожизненный риск развития радиационно-

индуцированных онкологических заболеваний. В связи с этим очень важно, чтобы принятие решения о проведении компьютерной томографии было обоснованным.

Несмотря на несомненную диагностическую пользу и информативность медицинских радиологических процедур, в том числе – компьютерной томографии [McCollough et al., 2009], при их проведении больной подвергается радиационному воздействию, которое может привести к риску возникновения онкологических или наследственных заболеваний [Huda, Mettler, 2011]. В связи с вышесказанным очень важно оценить величину радиационного риска и решить вопрос: превышает ли польза получаемой информации возможный риск, связанный с радиационным воздействием?

Рассмотрим пример расчёта радиационного риска при планируемой КТ грудной клетки девочки в возрасте 12 лет. Будем считать, что радиационному воздействию подвергаются 5 органов: лёгкие, молочная железа, пищевод, желудок, печень. Планируемые дозы облучения на эти органы также считаются известными (табл. 4.1.11).

Таблица 4.1.11.

Пожизненные атрибутивные риски онкозаболеваемости и онкосмертности, приведённые на 10000 человек, и пожизненной атрибутивной доли онкозаболеваемости и онкосмертности после облучения девочки в возрасте 12 лет при обследовании на КТ области грудной клетки

Облучённый орган	Доза облучения, мГр	LAR^{inc}	LAR^{mort}	$LARF^{inc}(\%)$	$LARF^{mort}(\%)$
Лёгкое	12	1,9008	1,8660	0,5280	0,6268
Молочная железа	10	4,2020	1,8910	0,5791	0,9585
Пищевод	12	0,1643	0,1598	0,3218	0,3389
Желудок	5	0,8465	0,5860	0,3218	0,4524
Печень	11	0,3905	0,3609	0,3306	0,4379

Сначала необходимо рассчитать риски для каждого из облучённых органов в отдельности. Начнём с лёгких. Доза радиации, полученная лёгкими, составляет 12 мГр. Из табл. 4.1.4 получаем пожизненный атрибутивный риск заболеваемости раком лёгких в возрасте 10-14 лет $LAR_{Lung}^{inc} = 0,1584$ на 10000 человек на 1 мГр. Умножаем теперь это значение из таблицы на 12 мГр, чтобы получить риск применительно к нашей дозе облучения лёгкого, получаем $LAR_{Lung}^{inc} = 12 \cdot 0,1584 = 1,9008$ на 10000 человек на 12 мГр. Таким образом, пожизненный атрибутивный риск для заболеваемости раком лёгкого получен.

Рассчитаем теперь пожизненную атрибутивную долю заболеваемости раком лёгких. Для этого из табл. 4.1.8 получаем пожизненный фоновый риск заболеваемости раком лёгких в возрасте 10-14 лет $LBR_{Lung}^{inc} = 358,10$ на 10000 человек. Подставим теперь в формулу (4.1.15) для вычисления $LARF$ пожизненный фоновый и пожизненный атрибутивный риски заболеваемости раком лёгких и получим коэффициент этиологической доли:

$$LARF_{Lung}^{inc} = \frac{LAR_{Lung}^{inc}}{LAR_{Lung}^{inc} + LBR_{Lung}^{inc}} \cdot 100\% = \frac{1,9008}{1,9008 + 358,10} \cdot 100\% = 0,528\%$$

Аналогично рассчитаем пожизненный атрибутивный риск и пожизненную атрибутивную долю для смертности от рака лёгкого (LAR_{Lung}^{mort} и $LARF_{Lung}^{mort}$), используя табл. 4.1.6 и 4.1.10. Такие же расчёты проведём и для остальных облучённых органов. В табл. 4.1.11 представлены результаты этих расчётов.

Получим теперь общий по всем облучённым органам пожизненный атрибутивный риск онкозаболеваемости и онкосмертности. Для этого просуммируем соответствующие риски по каждому органу. В итоге получим $LAR_{total}^{inc} = 7,5041$ на 10000 человек и $LAR_{total}^{mort} = 4,8638$ на 10000 человек. Чтобы получить общую по всем облучённым органам пожизненную атрибутивную долю онкозаболеваемости

и онкосмертности, необходимо просуммировать соответствующие пожизненные фоновые риски по каждому органу (табл. 4.1.3–4.1.10). Пропедев это, получим $LBR_{total}^{inc}=1510,33$ на 10000 человек и $LBR_{total}^{mort}=749,24$ на 10000 человек. Теперь, используя формулу (4.1.15) для $LARF$, получим общую по всем облучённым органам пожизненную атрибутивную долю онкозаболеваемости и онкосмертности:

$$LARF_{total}^{inc} = \frac{LAR_{total}^{inc}}{LAR_{total}^{inc} + LBR_{total}^{inc}} \cdot 100\% = \frac{7,5041}{7,5041 + 1510,33} \cdot 100\% = 0,4944\%;$$

$$LARF_{total}^{mort} = \frac{LAR_{total}^{mort}}{LAR_{total}^{mort} + LBR_{total}^{mort}} \cdot 100\% = \frac{4,8638}{4,8638 + 749,24} \cdot 100\% = 0,6450\%.$$

Таким образом, получены общие по всем облучённым органам пожизненные атрибутивные риски онкозаболеваемости и онкосмертности, а также пожизненная атрибутивная доля онкозаболеваемости и онкосмертности. Используя эти оценки, врач-радиолог имеет важную дополнительную информацию для принятия решения о целесообразности проведения КТ конкретному больному.

4.2. Оценка радиационного риска медицинского облучения в терминах эффективной и органных доз

Согласно Рекомендации МКРЗ (Публикация 103, п. 340) «оценку риска медицинской диагностики и лечения с использованием ионизирующего излучения лучше всего проводить, используя соответствующие значения риска для отдельных тканей под риском... Эффективная доза может быть полезна для относительного сравнения доз от различных диагностических процедур и для сравнения применения аналогичных технологий и процедур исследования в различных лечебных учреждениях» [ICRP, 2007a]. В 105 Публикации МКРЗ, посвящённой конкретно радиационной защите в медицине, ограничение по использованию эффективной дозы для рискованного анализа даётся более жёстко

(п. 31): «...её (эффективную дозу) не следует использовать для оценки риска стохастических эффектов...» [ICRP, 2007b].

Таким образом, в вышедших недавно международных и национальных стандартах и рекомендациях указывается на необходимость оценки радиационных рисков при медицинском облучении и ограничении использования для этих целей величины эффективной дозы.

Вместе с тем, оценка радиационных рисков по эффективной дозе продолжает использоваться на практике, что делает необходимым определение на численном уровне отличий в пожизненном радиационном риске, полученном на основе эффективной и органных доз. Эта необходимость вызвана также тем, что в сети интернет уже рекламируются ориентированные на врачей-радиологов компьютерные коды, использующие эффективную дозу для прогноза возможных стохастических эффектов медицинского облучения [<http://www.xrayrisk.com>].

Данный раздел посвящен определению отличий в оценке радиационного риска на основе органных и эффективной доз облучения на примере планирования диагностической процедуры с использованием компьютерной томографии. Оцениваются радиационные риски возможных онкологических заболеваний при проведении диагностических рентгенорадиологических процедур на основе органных и эффективной доз.

Пожизненный атрибутивный риск онкологической заболеваемости после компьютерной томографии

Как уже отмечалось, модель МКРЗ позволяет оценить пожизненный риск возникновения рака исследуемой локализации после однократного облучения заданной дозой. Он рассчитывается суммированием значений избыточного абсолютного риска по достигнутому возрасту (4.1.13).

Величина пожизненного риска сильно зависит от того,

для какой популяции он вычисляется. Это связано с тем, что функция здорового дожития S и $EAR_{однокр.}$ из (4.1.13) зависят от фонового показателя заболеваемости раком. Кроме того, S также зависит от фоновых показателей смертности от рака и показателей общей фоновой смертности от всех причин. А эти величины, в свою очередь, значительно отличаются для различных стран [BEIR, 2005].

На рис. 4.2.1, 4.2.2 показаны функции здорового дожития для солидных типов рака для населения России (популяция RF [Чиссов и др., 2010]) и усреднённой европейско-американской и азиатской популяции (популяция ЕАА [ICRP, 2007a]). В частности, как видно из рис. 4.2.1 (мужчины), в популяции RF около 50 % солидных раков реализуется в возрасте до 65 лет, а в популяции ЕАА – в возрасте около 80 лет. Понятно, что эти особенности приведут в дальнейшем к существенным отличиям величины пожизненного радиационного риска LAR для этих популяций.

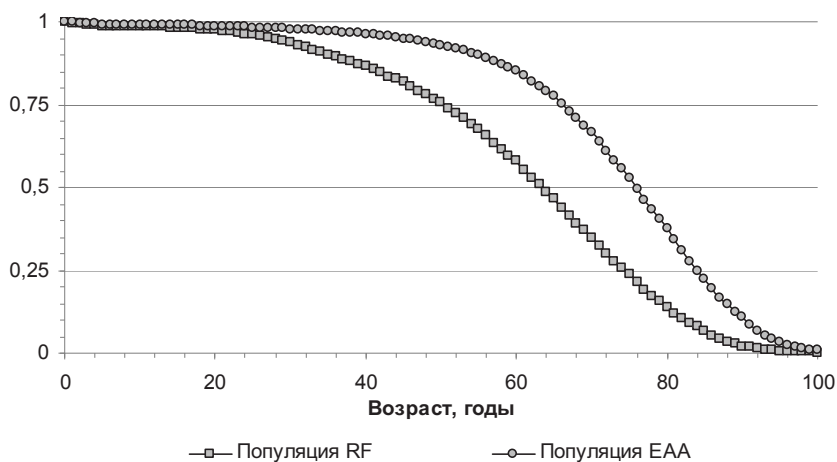


Рис. 4.2.1. Функция здорового дожития у мужчин по солидным ракам

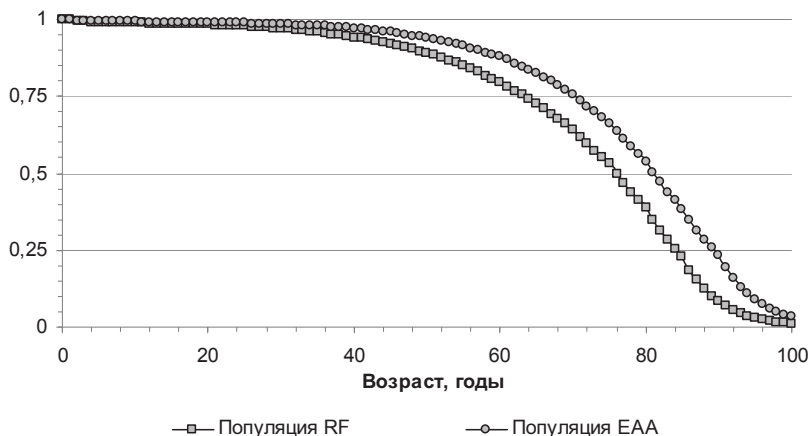


Рис. 4.2.2. Функция здорового дожития у женщин по солидным ракам

При наличии конкретных численных значений органных доз (например, при проведении диагностических рентгенорадиологических процедур) величина LAR определяется следующим образом:

$$LAR_{org}(g, e, s, \{H_T\}) = \sum_T LAR_{однокр.}(g, e, T, s, H_T),$$

где H_T – органный (эквивалентный) дозу в органе T , а $LAR_{однокр.}$ Вычисляется по формуле (4.1.13).

Величина пожизненного атрибутивного риска (LAR) на основе эффективной дозы E оценивается по формуле:

$$LAR_{eff}(g, e, s, E) = LAR_{однокр.}(g, e, T = \text{все солидные раки}, s, E),$$

где, как известно, $E = \sum_T w_T \cdot H_T$, w_T – коэффициент взвешивания для органа (ткани) T [ICRP, 2007a].

Кроме указанных выше формул для определения LAR_{org} , LAR_{eff} также введено их отношение:

$$R(g, s, E, \{H_T\}) = \frac{LAR_{org}(g, e, s, \{H_T\})}{LAR_{eff}(g, e, s, E)}.$$

Далее рассматривается пример оценки LAR_{org} , LAR_{eff} и

коэффициента R для условий планирования компьютерной томографии.

В табл. 4.2.1 приведено сравнение величин пожизненного атрибутивного риска (LAR) на 10^{-4} Зв $^{-1}$ для популяций RF и ЕАА с аналогичными данными 103 Публикации МКРЗ [ICRP, 2007a]. Легко заметить, что величина LAR для популяции ЕАА находится в хорошем согласии с данными 103 Публикации МКРЗ. Вместе с тем, величина LAR для популяции RF как в целом по всем ракам, так и по отдельным локализациям, существенно меньше LAR для популяции ЕАА. Эта разница определяется, прежде всего, серьёзными отличиями этих популяций по функциям здорового дожития, показанным на рисунках 4.2.1, 4.2.2.

В работе [Fujii et al., 2007] приведены значения органных доз при компьютерной томографии грудного и абдоминального отделов для детей и взрослых. В табл. 4.2.2, 4.2.3 показаны основные параметры рассмотренных КТ-сканеров (А-Г).

Таблица 4.2.1.
Величина LAR для популяций RF и ЕАА, 10^{-4} Зв $^{-1}$

Орган или ткань	Коэффициенты номинального риска МКРЗ (табл. А4.1 [ICRP, 2007a]), 10^{-4} Зв $^{-1}$	Пожизненный риск (LAR) заболеваемости раком, 10^{-4} Зв $^{-1}$		RF/МКРЗ	ЕАА/МКРЗ
		RF	ЕАА		
Пищевод	15	8,0	15,4	0,53	1,03
Желудок	79	53,6	88,0	0,68	1,11
Толстый кишечник	65	31,4	74,2	0,48	1,14
Печень	30	13,9	33,6	0,46	1,12
Лёгкие	114	68,0	127,2	0,60	1,12
Молочная железа	112	75,5	105,6	0,67	0,94
Яичник	11	9,3	11,9	0,85	1,08
Мочевой пузырь	43	22,9	51,5	0,53	1,20
Щитовидная железа	33	31,1	31,3	0,94	0,95
Остальные	144	107,4	154,0	0,75	1,07
Лейкозы	42	58,1	60,9	1,38	1,45
Все раки*	688	479,0	753,6	0,70	1,10

* Исключая рак кожи и костей.

Таблица 4.2.2.

Параметры КТ-сканеров при обследовании грудного отдела
для детей и взрослых [Fujii et al., 2007]

		Сканер						
		A	B	C	D	E	F	G
Напряжение рентгеновской трубки (кВ)		120	120	120	120	120	120	120
Время ротации (с/скан)								
Дети		0,5	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,33
Взрослые		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,37	0,33
Ширина среза (коллимация среза × кол-во срезов)								
Дети		2 мм × 8	3 мм × 8	1 мм × 16	1 мм × 16	1,5 мм × 16	1,5 мм × 16	0,6 мм × 64
Взрослые		2 мм × 8	4 мм × 8	1 мм × 16	1 мм × 16	1,5 мм × 16	0,75 мм × 16	0,6 мм × 64
Питч								
Дети		0,875	0,875	0,9375	1,4375	1,0	1,125	1,4
Взрослые		0,875	0,875	0,9375	0,9375	0,75	1,108	0,9
Метод автоматической модуляции силы тока								
Дети		Fixed(100 mA)	Real EC	Real EC	Fixed(150 mA)	Care dose	Care dose 4D	Care dose 4D
Взрослые		Real EC	Real EC	Real EC	Real EC			
Сила тока (мАс)								
Дети		58	57	31	52	20	45	97
Взрослые		127	106	138	148	101	125	160
КТ область сканирования (мм)								
Дети		190	203	200	185	210	196	215
Взрослые		280	287	301	308	260	300	300

Таблица 4.2.3.

Параметры КТ-сканеров при обследовании абдоминального
отдела для детей и взрослых [Fujii et al., 2007]

	Сканер						
	A	B	C	D	E	F	G
Напряжение рентгеновской трубки (кВ)	120	120	120	120	120	120	120
Время ротации (с/скан)							
Дети	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Взрослые	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Ширина среза (коллимация среза × кол-во срезов)							
Дети	2 мм × 8	2 мм × 8	2 мм × 16	2 мм × 16	1,5 мм × 16	1,5 мм × 16	1,2 мм × 24
Взрослые	2 мм × 8	4 мм × 8	2 мм × 16	2 мм × 16	1,5 мм × 16	1,5 мм × 16	0,6 мм × 64
Питч							
Дети	0,875	0,875	0,9375	1,4375	1,0	1,125	1,15
Взрослые	0,875	0,875	0,9375	0,9375	0,75	0,75	0,9
Метод автоматической модуляции силы тока							
Дети	Real EC	Real EC	Fixed(150 mA)	Fixed(150 mA)	Care dose	Care dose 4D	Care dose 4D
			Real EC	Real EC			
Взрослые	Real EC	Real EC	Сила тока (мAc)				
Дети	40	41	80	52	40	68	82
Взрослые	112	150	115	146	102	149	165
КТ область сканирования (мм)							
Дети	280	280	300	250	260	293	293
Взрослые	435	420	448	406	400	467	446

На рис. 4.2.3, 4.2.4 показана зависимость величины пожизненного атрибутивного риска (LAR) от возраста при компьютерной томографии грудного и абдоминального отделов у мальчиков и девочек из популяций RF и EAA, а на рис. 4.2.5, 4.2.6 – зависимость LAR от возраста при компьютерной томографии грудного и абдоминального отделов у мужчин и женщин из указанных популяций.

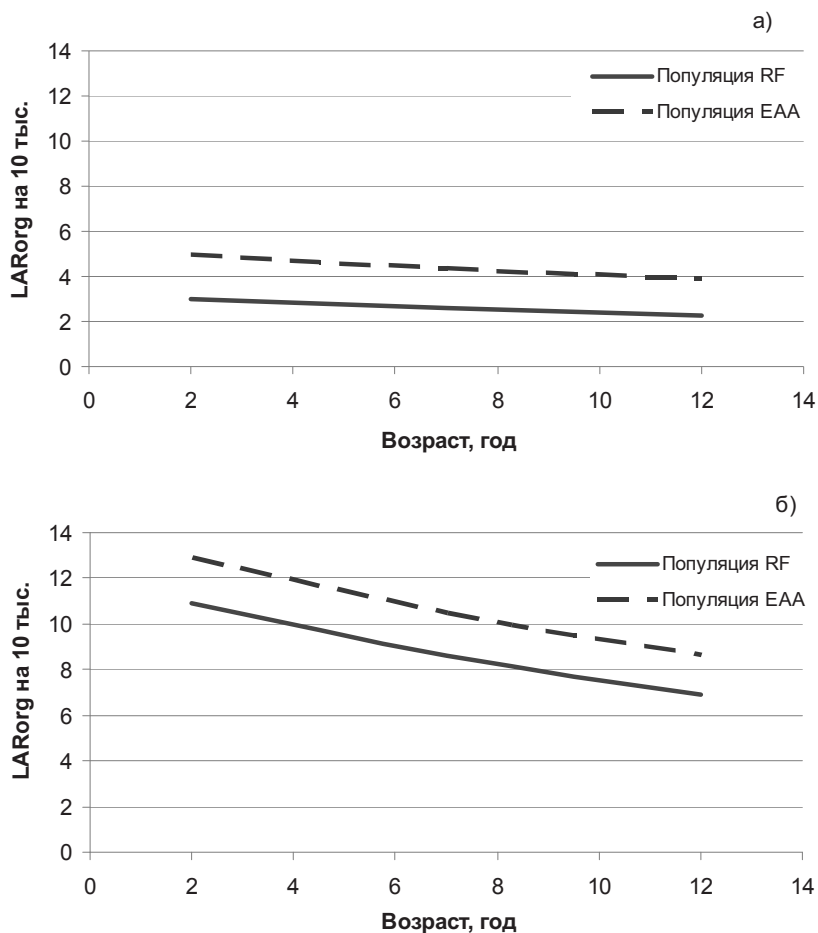


Рис. 4.2.3. Зависимость LAR_{org} на 10 тыс. человек от возраста при компьютерной томографии грудного отдела мальчиков (а) и девочек (б) из популяций RF и EAA (сканер А, табл. 4.2.2)

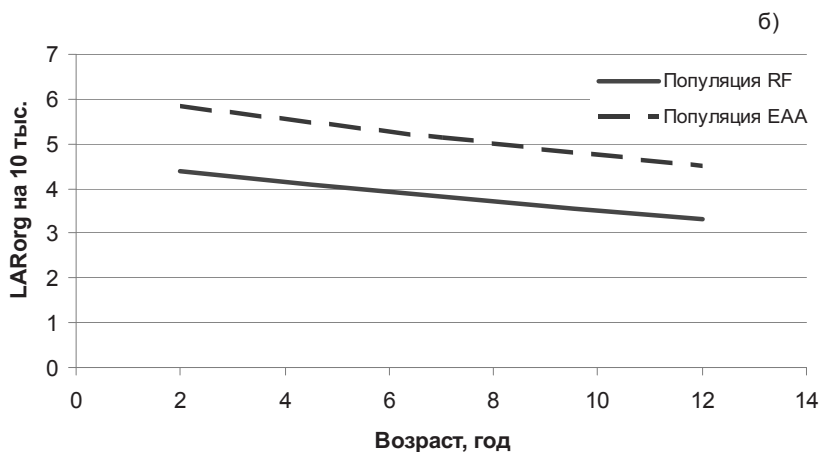
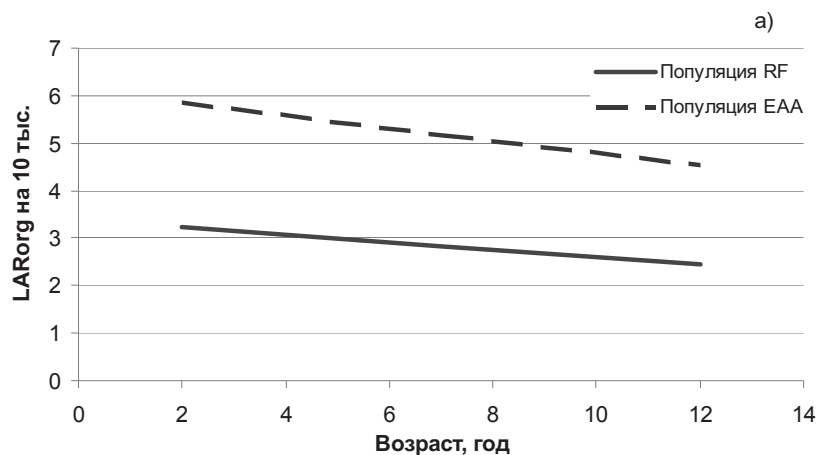


Рис. 4.2.4. Зависимость LAR_{org} на 10 тыс. человек от возраста при компьютерной томографии абдоминального отдела мальчиков (а) и девочек (б) из популяций RF и EAA (сканер А, табл. 4.2.3)

В табл. 4.2.4–4.2.7 дано отношение LAR_{org} к LAR_{eff} , формулы (4.1.2)–(4.1.3), для всех типов КТ-сканеров (А-Г), для которых органные дозы были получены в работе [Fujii et al., 2007]. Расчёты выполнены для компьютерной томографии грудного и абдоминального отделов для мужчин и женщин.

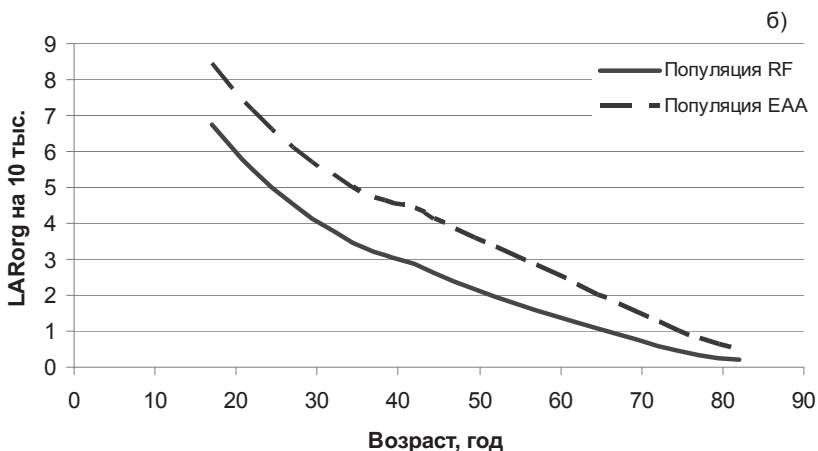
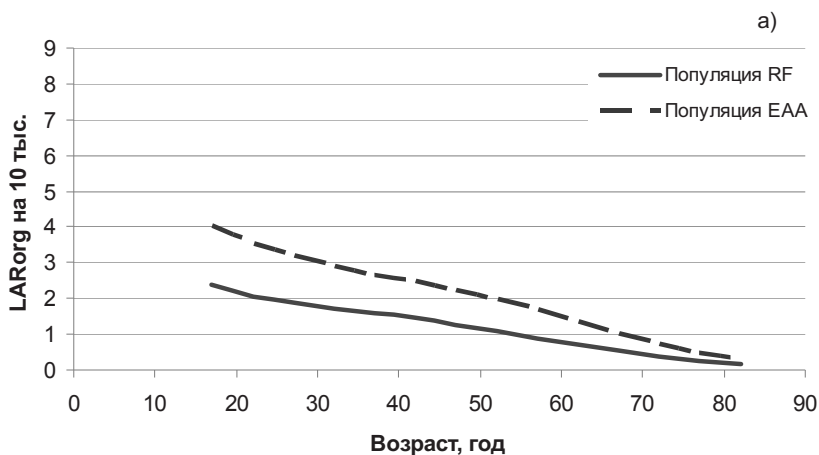


Рис. 4.2.5. Зависимость LAR_{org} на 10 тыс. человек от возраста при компьютерной томографии грудного отдела мужчин (а) и женщин (б) из популяций RF и EAA (сканер E, табл. 4.2.2)

В табл. 4.2.8 и 4.2.9 приведены распределения пожизненного риска для отдельных органов и тканей в абсолютных величинах (на 10 тыс. человек) и в процентах от суммарного пожизненного риска по отдельным локализациям. Как видно из рис. 4.2.3–4.2.6, максимальное значение LAR_{org}

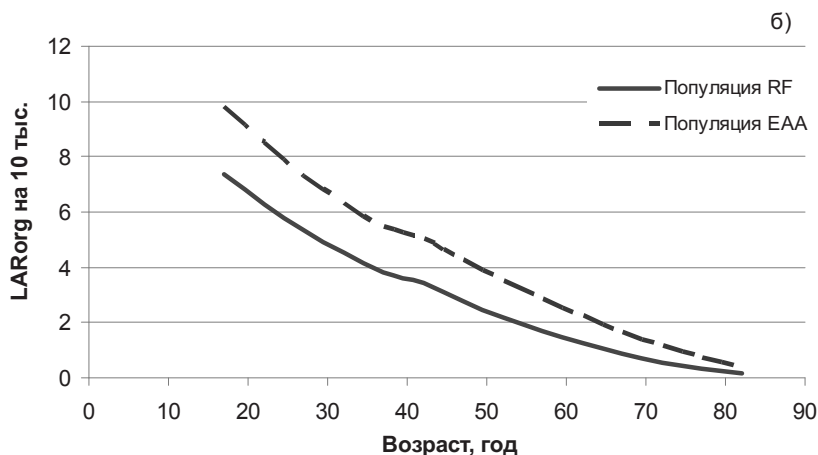
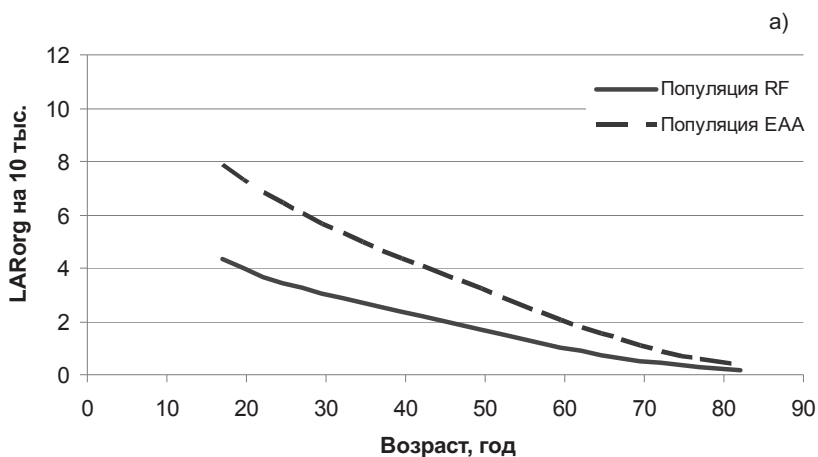


Рис. 4.2.6. Зависимость LAR_{org} на 10 тыс. человек от возраста при компьютерной томографии абдоминального отдела мужчин (а) и женщин (б) из популяций RF и EAA (сканер E, табл. 4.2.3)

достигается для возрастной группы 0-4 года при компьютерной томографии грудного отдела детей и для возрастной группы 15-19 лет при компьютерной томографии абдоминального отдела.

Значение коэффициента $R = LAR_{\text{orig}}/LAR_{\text{eff}}$ для различных возрастных групп из популяции RF и EAA при компьютерной томографии грудного отдела у мужчин

236

Таблица 4.2.8.

Распределение пожизненного риска для отдельных органов и тканей в абсолютных величинах и в процентах от суммарного пожизненного риска для возрастной группы 0-4 года при облучении в результате процедуры компьютерной томографии грудного отдела детей (томограф А)

Орган или ткань	Доза, мГр	Популяция RF				Популяция EAA			
		Мужчины		Женщины		Мужчины		Женщины	
		Пожизненный риск (LAR) заболеваемости раком, 10 ⁻⁴				заболеваемости раком, 10 ⁻⁴			
		LAR	%	LAR	%	LAR	%	LAR	%
Щитовидная железа Лёгкие Пищевод Печень Желудок Толстый кишечник Мочевой пузырь Красный костный мозг Яичники Молочная железа Остальные	7,9	0,262	8,71	2,820	25,84	0,367	7,38	2,263	17,60
	9,8	0,434	14,43	0,924	8,47	0,823	16,57	1,638	12,74
	9,5	0,108	3,60	0,053	0,49	0,214	4,31	0,150	1,17
	8,1	0,368	12,25	0,211	1,93	0,830	16,71	0,391	3,04
	2,7	0,244	8,10	0,479	4,39	0,445	8,97	0,642	4,99
	0,4	0,038	1,25	0,023	0,21	0,087	1,75	0,040	0,31
	0,1	0,004	0,13	0,004	0,04	0,010	0,20	0,008	0,07
	2,8	0,292	9,72	0,134	1,23	0,295	5,94	0,133	1,03
	0,1	-	-	0,005	0,04	-	-	0,006	0,04
	8,5	-	-	4,941	45,28	-	-	6,173	48,01
Все ЗНО	4,0 ^a (3,5 ^b)	1,258	41,82	1,318	12,08	1,895	38,16	1,414	11,00
		3,008	100	10,912	100	4,966	100	12,859	100

^а – доза облучения у мужчин; ^б – доза облучения у женщин.

Таблица 4.2.9.

Распределение пожизненного риска для отдельных органов и тканей в абсолютных величинах и в процентах от суммарного пожизненного риска для возрастной группы 15-19 лет при облучении в результате процедуры компьютерной томографии абдоминального отдела взрослых (томограф E)

Орган или ткань	Доза, мГр	Популяция RF				Популяция EAA			
		Мужчины		Женщины		Мужчины		Женщины	
		Пожизненный риск (LAR) заболеваемости раком, 10 ⁻⁴							
		LAR	%	LAR	%	LAR	%	LAR	%
Щитовидная железа Лёгкие Пищевод Печень Желудок Толстый кишечник Мочевой пузырь Красный костный мозг Яичники Молочная железа Остальные	0,3	0,003	0,06	0,030	0,41	0,004	0,05	0,023	0,24
	5,2	0,255	5,88	0,520	7,05	0,470	5,98	0,934	9,51
	5,6	0,053	1,21	0,033	0,44	0,103	1,31	0,078	0,80
	10,5	0,313	7,20	0,182	2,47	0,732	9,31	0,350	3,56
	11,6	0,710	16,34	1,379	18,70	1,308	16,64	1,837	18,71
	11,7	0,759	17,46	0,460	6,24	1,799	22,89	0,810	8,25
	10,3	0,323	7,45	0,341	4,62	0,773	9,83	0,676	6,89
	5,4	0,557	12,83	0,254	3,44	0,568	7,23	0,259	2,64
	11,5	-	-	0,377	5,11	-	-	0,431	4,39
	7,2	-	-	2,000	27,13	-	-	2,472	25,17
8,2 ^a (8,4 ^b)	1,371	31,56	1,798	24,39	2,104	26,76	1,949	19,85	
Все ЗНО		4,344	100	7,373	100	7,861	100	9,819	100

^a – доза облучения у мужчин; ^b – доза облучения у женщин.

Таким образом, оценка величины $R = LAR_{org}/LAR_{eff}$ напрямую даёт численное представление об ошибках в оценке пожизненного атрибутивного риска, когда для этих целей используются эффективные, а не органные дозы. На основании полученных результатов, представленных в табл. 4.2.4–4.2.9 и на рис. 4.2.3–4.2.6 можно сделать следующие выводы:

1. Как видно из табл. 4.2.6 (сканер А, популяция ЕАА, грудной отдел, возрастная группа 80-85 лет, женщины), величина R может превышать значение 3. С другой стороны, как видно из табл. 4.2.7 (сканер А, популяция ЕАА, абдоминальный отдел, возрастная группа 20-24 года, женщины), величина $R=0,72$, т.е. меньше единицы. В первом случае использование эффективной дозы занижает пожизненный атрибутивный риск более чем в 3 раза, во втором – завышает примерно на 30 %. Понятно, что полученные оценки говорят о серьёзном искажении в определении LAR , когда используется эффективная, а не органная доза.

2. Сравнение величины R для когорт RF и ЕАА показывает, что искажение в оценке пожизненного риска на основе эффективных доз более выражено для популяции ЕАА – усреднённой европейско-американской и азиатской популяции. Это определяется тем, что вероятность здорового дожития в популяции ЕАА выше, чем в популяции RF.

3. Как видно из табл. 4.2.4–4.2.7, величина $R = LAR_{org}/LAR_{eff}$ выше у женщин, чем у мужчин. Это может быть обусловлено тем, что радиационный риск на единицу дозы у женщин выше, чем у мужчин.

4. Величины R при компьютерной томографии грудного и абдоминального отделов существенно отличаются. Как, например, видно из табл. 4.2.6, 4.2.7 (популяция ЕАА), при компьютерной томографии грудного отдела $R > 1$ (т.е. эффективная доза занижает риск), а при компьютерной томографии абдоминального отдела для большинства возрастных групп $R < 1$ (т.е. эффективная доза завышает риск).

5. Анализ распределения пожизненных рисков (табл. 4.2.7, 4.2.8) по отдельным органам и тканям показал, что наибольший вклад в суммарный пожизненный риск при исследовании грудного отдела вносят:

а) для мужчин – лёгкие и печень (14,4 и 12,3 % соответственно);

б) для женщин – молочная железа и щитовидная железа (48,0 и 17,6 % соответственно);

при исследовании абдоминального отдела:

а) для мужчин – желудок и толстый кишечник (16,3 и 17,5 % соответственно);

б) для женщин – молочная железа и желудок (25,2 и 17,6 % соответственно).

Полученные оценки имеют важное значение для оптимизации технологий профилактической помощи после проведения компьютерной томографии.

7. Полученные в работе результаты подтверждают правильность основного вывода МКРЗ о том, что эффективную дозу не следует использовать для оценки радиационных рисков стохастических онкологических эффектов [ICRP, 2007a].

4.3. Расчёт эквивалентных доз в отдельных органах и тканях при проведении типовых обследований с использованием компьютерной томографии

В последние годы всё больше внимания уделяется вопросу оценки вреда здоровью пациентов в случаях применения радиационных технологий в диагностических целях в медицине, особенно эта проблема актуальна при использовании компьютерной томографии (КТ). Данная проблема отражена в международных рекомендациях и национальных требованиях в России.

В предыдущих разделах (4.1, 4.2) были предложены способы и получены оценки радиационного риска КТ при её

однократном использовании. Были рассмотрены способы оценки величины пожизненного атрибутивного риска онкологической заболеваемости на основе эквивалентных доз в органах и тканях и на основе значения эффективной дозы.

Следует повторить, что, согласно Рекомендации МКРЗ (Публикация 103), оценку риска медицинской диагностики и лечения с использованием ионизирующего излучения лучше всего проводить, используя соответствующие значения риска для отдельных тканей под риском. В более поздних документах использование эффективной дозы для оценки риска стохастических эффектов было снижено. В Публикации 105 МКРЗ сказано, что «эффективная доза не должна использоваться для оценки риска стохастических эффектов».

Серьёзным вопросом применения на практике врачами-радиологами технологии оценки радиационных рисков на основе органных доз облучения при КТ является сложность оценки эквивалентных доз в органах и тканях. В то же время, величина Dose Length Product (DLP) – мера поглощённой дозы облучения за всё КТ-исследование – сообщается после каждой процедуры сканирования и всегда доступна врачам-радиологам [МУ, 2011].

Основной целью данного раздела является разработка метода расчёта эквивалентных доз в отдельных органах и тканях и величины радиационного риска на основе меры поглощённой дозы облучения за всё КТ-исследование – DLP – при проведении типовых процедур компьютерной томографии.

Расчёт органных доз на основе величины DLP

На сегодняшний день наиболее часто используемой в практике характеристикой вреда от облучения, наносимого пациенту в результате проведения процедуры КТ, все еще является значение эффективной дозы. Согласно определе-

нию МКРЗ [ICRP, 2007a], эффективная доза рассчитывается как взвешенная сумма доз поглощенных в органах и тканях по следующей формуле:

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T ,$$

w_T – коэффициент взвешивания для органа (ткани) T [ICRP, 2007a].

Многие современные коммерческие томографы предоставляют информацию о величине эффективной дозы после завершения процедуры сканирования на КТ. Значение эффективной дозы также может быть оценено с использованием меры поглощённой дозы облучения за все КТ-исследование DLP (мГр×см) и величины нормализованной эффективной дозы (мЗв×мГр⁻¹×см⁻¹) [Jessen et al., 2000; Shrimpton 2006; МУ, 2011]. Эти величины нормализованной эффективной дозы зависят от анатомической области исследования и возраста на момент облучения. В соответствии с Методическими указаниями по контролю доз облучения пациентов при КТ-исследованиях, утверждёнными в России в 2011 г. [МУ, 2011], эффективная доза может быть рассчитана по следующей формуле:

$$E = \sum_k DLP_k \times e_k^{DLP} ,$$

где DLP_k – величина, равная произведению дозы на длину сканирования k -ой анатомической области (мГр×см); e_k^{DLP} – нормализованная эффективная доза k -ой анатомической области взрослого человека (18 лет и старше): 0,0023 мЗв×мГр⁻¹×см⁻¹ для головы, 0,0054 мЗв×мГр⁻¹×см⁻¹ для шейного отдела, 0,017 мЗв×мГр⁻¹×см⁻¹ для грудного отдела, 0,015 мЗв×мГр⁻¹×см⁻¹ для брюшной полости и 0,019 мЗв×мГр⁻¹×см⁻¹ для малого таза.

Используя типичное распределение органных доз для k -ой анатомической области сканирования, можно получить значение органной дозы для соответствующего органа или ткани по формуле:

$$H_T^k = f_T^k \times H_N^k,$$

где H_T^k – доза конкретного органа или ткани T для k -ой анатомической области сканирования; f_T^k – коэффициент пропорциональности дозы, равный отношению величины органной дозы конкретного органа или ткани T к величине органной дозы нормирующего органа для k -ой анатомической области сканирования; H_N^k – доза нормирующего органа или ткани для k -ой анатомической области сканирования. Были выбраны следующие нормирующие органы (ткани) в зависимости от области сканирования: лёгкие – для грудного отдела, желудок – для брюшной полости и мозг – при исследовании головы.

Таким образом, при сканировании k -ой анатомической области выражение для определения эффективной дозы может быть представлено в виде:

$$DLP_k \times e_k^{DLP} = \sum_T w_T \times f_T^k \times H_N^k.$$

И, если f_T^k для конкретного органа или ткани известно, то можно рассчитать дозу нормирующего органа для k -ой анатомической области сканирования, используя формулу:

$$H_N^k = \frac{DLP_k \times e_k^{DLP}}{\sum_T w_T \times f_T^k}.$$

Ниже определены коэффициенты пропорциональности дозы f_T^k для трёх анатомических областей сканирования: грудь, брюшная полость и голова. Компьютерная программа СТ-Expo v2.1 была использована для оценки величин органных доз и коэффициентов пропорциональности для 10-ти отобранных коммерческих сканеров (табл. 4.3.1). Значения величин органных доз, основанные на методе Монте-Карло, были рассчитаны для фантома взрослого мужчины (Адам, рост 170 см, вес 70 кг) и для фантома взрослой женщины (Ева, рост 160 см и вес 60 кг) [Stamm, Nagel, 2002].

Таблица 4.3.1.

*Модель и фирма-производитель КТ, используемых
для оценки органных доз и коэффициентов
пропорциональности дозы f_T^k*

Производитель	Модель
Siemens	Emotion 6
	Emotion Duo
	Sensation 16
	Sensation 64
GE	LightSpeed 16
	LightSpeed VCT
Philips	Briliance 16
	Briliance 64
Toshiba	Aquilion 64
	Aquilion Premium

Коэффициенты пропорциональности дозы f_T^k для грудного отдела и брюшной полости рассчитывались как средние значения по всем томографам (табл. 4.3.3) и всем вариациям размера сканируемой области с z- до z+ (табл. 4.3.2). Для исследования головы коэффициенты пропорциональности дозы f_T^k рассчитывались только как средние значения по всем томографам.

Используя компьютерную программу СТ-Expo v2.1, были рассчитаны органные дозы и оценены коэффициенты пропорциональности дозы – f_T^k для трёх анатомических областей сканирования: грудной отдел, брюшная полость и голова женщины. Средние величины коэффициентов пропорциональности дозы f_T^k и стандартные отклонения – σ , связанные со спецификой дозового распределения, при сканировании грудного отдела, брюшной полости и головы, приведены в табл. 4.3.3.

Таблица 4.3.2.

Значения координат начала и окончания области сканирования z- и z+ для исследования грудного отдела и брюшной полости

Грудной отдел			Брюшная полость		
Размер исследуемой области, см	Положение от: z-	Положение до: z+	Размер исследуемой области, см	Положение от: z-	Положение до: z+
26	39	65	32	0	32
26	42	68	35	0	35
26	45	71	38	0	38
26	36	62	41	0	41
26	33	59	44	0	44
29	39	68	47	0	47
32	39	71	35	3	38
29	36	65	41	3	44
32	33	65	39	6	47

Как видно из табл. 4.3.3, для каждой анатомической области сканирования можно выделить набор органов, для которых характерны наибольшие дозовые нагрузки. Для грудного отдела такими органами являются: лёгкие, щитовидная железа, молочная железа и пищевод. При сканировании брюшной полости наибольшие дозы характерны для желудка, печени, толстого кишечника, яичников и мочевого пузыря. Исследования головы пациентов, в большей степени, приводит к облучению головного мозга. Доза облучения на хрусталик глаза не рассматривалась (хотя сравнима по величине с дозой облучения головного мозга), так как не даёт вклад в суммарную эффективную дозу облучения пациента.

Оценка неопределённости величины органной дозы осуществлялась путём оценки 95 %-ных доверительных интервалов (ДИ) для среднего значения. Использовался метод прямых статистических испытаний на ЭВМ. При использовании методики вычисления органных доз по известному значению DLP для получения случайных реализаций органных доз используется табл. 4.3.3. При этом вначале по закону

Таблица 4.3.3.

Коэффициент пропорциональности дозы (f_T^k) органа или ткани T , относительно дозы на лёгкие, желудок и мозг для процедур сканирования грудного отдела, брюшной полости и головы соответственно

Орган или ткань	Коэффициент пропорциональности дозы $f_T^k \pm \sigma$		
	Грудной отдел	Брюшная полость	Голова
Мозг	$0,02 \pm 0,017$	-	1*
Слюнные железы	$0,32 \pm 0,366$	$0,01 \pm 0,002$	$0,175 \pm 0,030$
Щитовидная железа	$0,94 \pm 0,602$	$0,01 \pm 0,005$	$0,045 \pm 0,006$
Молочная железа	$1,05 \pm 0,030$	$0,35 \pm 0,348$	-
Пищевод	$0,99 \pm 0,058$	$0,05 \pm 0,045$	$0,002 \pm 0,000$
Лёгкие	1*	$0,31 \pm 0,214$	$0,002 \pm 0,000$
Печень	$0,47 \pm 0,212$	$0,94 \pm 0,073$	-
Желудок	$0,37 \pm 0,206$	1*	-
Толстый кишечник	$0,01 \pm 0,004$	$0,92 \pm 0,197$	-
Яичники	$0,01 \pm 0,004$	$0,96 \pm 0,187$	-
Мочевой пузырь	$\pm 0,001$	$1,03 \pm 0,216$	-
Красный костный мозг	$0,27 \pm 0,016$	$0,49 \pm 0,061$	$0,111 \pm 0,016$
Поверхность кости	$0,72 \pm 0,042$	$0,74 \pm 0,074$	$0,257 \pm 0,037$
Кожа	$0,27 \pm 0,020$	$0,41 \pm 0,046$	$0,062 \pm 0,009$
Остальные	$0,46 \pm 0,071$	$0,69 \pm 0,039$	$0,020 \pm 0,003$

* нормирующий орган (ткань) для k -ой анатомической области.

нормального распределения генерируются случайные реализации коэффициентов f_T^k , где в качестве среднего и стандартного отклонения выбираются соответствующие значения из табл. 4.3.3. Затем по описанной выше методике, используя полученные случайные реализации коэффициентов f_T^k , вычисляются органные дозы для всех рассматриваемых органов и тканей. Описанная процедура повторяется в данной работе 10000 раз. Таким образом, формируется статистическая выборка, состоя-

щая из реализаций органных доз. По данным выборкам оценивается верхняя и нижняя 95 % доверительные границы.

Используя среднее значения коэффициента пропорциональности для конкретного органа или ткани f_T^k , а также представленные ранее формулы, оценены эквивалентные органные дозы (H_T) и 95 %-ный ДИ интервал дозы для значения $DLP=100 \text{ мГр см}^{-1}$ для процедур сканирования грудного отдела, брюшной полости и головы (табл. 4.3.4).

Представленная таблица позволяет легко оценивать эквивалентные дозы облучения отдельных органов, получаемые пациентами при процедуре КТ-сканирования грудного отдела брюшной полости, а также головы.

Используя предложенный метод для перехода от DLP к органным дозам, в качестве примера мы оценили пожизненный атрибутивный риск возникновения рака для женщины после её однократного облучения на КТ в возрасте 30 лет. Мы сравнили результат с рисками, оценёнными с помощью органных доз, измеренными маленькими (<7 мм в ширине) силиконовыми фотодиодными дозиметрами (34 в общей сложности), которые были имплантированы в различные органы и ткани фантома взрослого человека. Эти величины органных доз были взяты для процедуры сканирования грудного отдела из работы [Fujii et al., 2009] для трёх различных сканеров: А, В, D. Для этих сканеров информация о значениях DLP была зафиксирована на консоли дисплеев во время процедуры сканирования. Величина пожизненного атрибутивного риска возможной индукции онкологических заболеваний оценивалась согласно рассмотренной ранее математической модели МКРЗ (Публикация 103) и с использованием медико-демографических характеристик российской популяции. В табл. 4.3.5 приведены результаты оценки величин LAR с 95 % ДИ, оценённых с использованием расчётных и измеренных органных доз. Величина относительной разницы значений LAR , выраженная как

$$\Delta = \left| \frac{(LAR_{FUJII} - LAR_{DLP})}{LAR_{DLP}} \cdot 100\% \right|,$$

также представлена в табл. 4.3.5.

Таблица 4.3.4.
Отношение между эквивалентной дозой (H_T) и DLP_{100} для процедур сканирования грудного и абдоминального отделов, а также головы

	Эквивалентная доза на орган (H_T) на DLP_{100} , мГр				
	Грудной отдел	Брюшная полость		Голова	
e_t^{DLP}	0,017	0,015		0,0023	
Орган или ткань	среднее значение	95 % ДИ	среднее значение	95 % ДИ	среднее значение
Мозг	0,07	(0,00; 0,17)	-	-	7,02
Слюнные железы	1,11	(0,00; 3,23)	0,02	(0,02; 0,03)	1,23
Щитовидная железа	3,26	(0,00; 6,17)	0,02	(0,00; 0,04)	0,32
Молочная железа	3,65	(3,23; 4,16)	0,85	(0,00; 2,04)	-
Пищевод	3,44	(2,96; 4,03)	0,12	(0,00; 0,30)	0,01
Лёгкие	3,47	(3,09; 3,97)	0,75	(0,00; 1,52)	0,01
Печень	1,63	(0,46; 2,83)	2,27	(1,87; 2,78)	-
Желудок	1,28	(0,09; 2,28)	2,42	(2,09; 2,86)	-
Толстый кишечник	0,03	(0,01; 0,06)	2,22	(1,52; 2,94)	-
Яичники	0,03	(0,01; 0,06)	2,32	(1,60; 3,07)	-
Мочевой пузырь	0,03	(0,02; 0,04)	2,49	(1,61; 3,40)	-
Красный костный мозг	0,94	(0,81; 1,10)	1,18	(0,91; 1,50)	0,78
Поверхность кости	2,50	(2,14; 2,93)	1,79	(1,42; 2,24)	1,80
Кожа	0,94	(0,79; 1,11)	0,99	(0,77; 1,26)	0,44
Остальные	1,60	(1,19; 2,02)	1,67	(1,40; 1,99)	0,14

Таблица 4.3.5.

Сравнение пожизненных атрибутивных рисков возможной индукции онкологических заболеваний (LAR) женщины в возрасте 30 лет на момент облучения, рассчитанных с использованием органных доз, полученных с использованием DLP и измеренных силиконовыми фотодиодными дозиметрами

Сканнер	LAR на 10 ⁴ человек	95 % ДИ	Δ, %
A _{Fujii}	25,77	(21,94; 29,72)	29,9
A _(DLP=672)	18,07	(15,93; 20,65)	
B _{Fujii}	14,03	(12,12; 15,99)	16,5
B _(DLP=436)	11,72	(9,66; 13,09)	
D _{Fujii}	10,36	(8,91; 11,90)	25,8
D _(DLP=286)	7,69	(6,82; 8,83)	

Из табл. 4.3.5 видно, что пожизненный атрибутивный риск, рассчитанный с помощью органных доз, полученных с использованием DLP, сравним с риском, полученным с помощью органных доз, измеренных дозиметрами в фантоме. Отличие не превышает значения 30 %.

Таким образом, предлагаемая методика может позволить врачам-радиологам использовать величину DLP для оценки пожизненного атрибутивного риска возможной индукции онкологических заболеваний.

4.4. Сравнение радиационных рисков профессионального и многократного медицинского облучений

Как уже отмечалось, в последние годы в научной и международной литературе были опубликованы данные о том, что в некоторых развитых в области атомной энергетики и промышленности странах, лучевая нагрузка медицинского облучения уже превысила уровень профессионального облучения. Проблема сопоставления оценок радиационного риска профессионального и медицинского облучений

рассмотрена в настоящем разделе.

Согласно данным, представленным в Публичном годовом отчете «Итоги деятельности Государственной корпорации по атомной энергии за 2012 год», в 2012 г. на дозиметрическом контроле в организациях Госкорпорации «Росатом» состояло 68393 человека из персонала категории А (категория приводится в соответствии с Нормами радиационной безопасности НРБ-99/2009 и ОСПОРБ-99/2009). Дозовая нагрузка на персонал за последнее десятилетие имеет выраженную тенденцию к снижению. Среднегодовая доза облучения персонала в 2012 г. составила 1,70 мЗв. В месте с тем, динамика количества рентгенодиагностических исследований и доз медицинского облучения населения России имеет ярко выраженный положительный тренд [Радиационно-гигиенический паспорт РФ, 2013]. Отмечается, что вклад компьютерной томографии в коллективную дозу медицинского облучения возрос с 26,3 % в 2011 г. до 29,6 % в 2012 г. Средняя доза при компьютерной томографии составляет 4,97 мЗв на процедуру. На сегодняшний день мировыми лидерами по количеству ежегодно проводимых исследований с использованием технологий компьютерной томографии являются США, Люксембург и Эстония. Так, по данным Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), в США в 2011 г. число процедур КТ на 1000 человек составило 273,8 сканирований в год [OECD Health Data: Health care resources: OECD Health Statistics (database). DOI:10.1787/ct-exams-tot-table-2013-1-en]. Согласно представленной статистике, при ожидаемой продолжительности жизни 80 лет человек может подвергнуться до 20 раз медицинскому облучению на КТ.

Сравнение радиационных рисков профессионального и медицинского облучений, а также оценка суммарного радиационного риска рассмотрены на примере облучения персонала со следующим сценарием: профессиональное облучение с дозой 1,7 мЗв в год с 18 до 60 лет и медицинское облучение – прохождение диагностических процедур с использованием КТ в 20, 25, 30, 45 и 50 лет. Число облучений на КТ (5 раз в тече-

ние жизни) выбрано заведомо ниже максимального (20 раз в течение жизни), т.к. абсолютное число компьютерных томографов и распространенность диагностических процедур с их применением в России ниже показателей США.

В настоящем примере рассмотрены два возможных способа расчёта радиационных рисков. В первом случае проводится прогноз радиационного вреда облучения у работников, которые только пришли на работу в отрасль (возраст 18 лет). Таким образом, риски оцениваются в предположении, что в дальнейшем к данному работнику будут применяться заданные условия облучения (профессиональное и медицинское). Кроме того, учитывается вероятность, что работник может заболеть онкологией или вообще не дожить до окончания облучения в 60 лет. Во втором случае считается, что работник уже дожил до 60 лет и подвергся профессиональному и медицинскому облучению (согласно сценарию), и радиационный риск рассчитывается на последующие годы жизни.

В табл. 4.4.1 и 4.4.2 приведены эквивалентные (органные) дозы в органах и тканях под риском после медицинского облучения при компьютерной томографии для мужчин и женщин отдельно. Аналогично случаю многократного медицинского облучения, рассмотренного в предыдущем разделе, предполагается, что облучение происходит на томографе «Siemens Emotion 6» и органные дозы рассчитаны при помощи компьютерной программы CT-Expo v2.1 [Stamm, Nagel, 2002].

Результаты оценки радиационных рисков онкологической заболеваемости профессионального и медицинского облучений

Основные результаты оценки радиационных рисков индукции возможных онкологических заболеваний при профессиональном и одновременно медицинском облучении по указанным выше сценариям приведены на рис. 4.4.1–4.4.8, а также в табл. 4.4.3–4.4.7.

Таблица 4.4.1.

Органные дозы (мГр), полученные мужчиной после прохождения компьютерной томографии в 20 лет (грудной отдел), 25 лет (таз), 30 лет (таз), 45 лет (плечи) и 50 лет (грудной отдел).

Данные получены при помощи программы СТ-Ехро путём обработки стандартных протоколов КТ исследований томографа Siemens Emotion 6

	Возраст при облучении	Пищевод	Желудок	Толстый кишечник	Печень	Лёгкие	Молочная железа	Яичник	Мочевой пузырь	Щитовидная железа	Остаточные согидные локализации	Красный костный мозг
Грудной отдел	20	8,95	1,94	0,12	2,98	9,25	0,00	0,00	0,00	2,78	1,76	2,22
Таз	25	0,01	1,05	10,16	0,76	0,04	0,00	0,00	13,10	0,00	3,51	4,53
Таз	30	0,01	1,05	10,16	0,76	0,04	0,00	0,00	13,10	0,00	3,51	4,53
Плечи	45	14,51	0,20	0,01	0,28	6,30	0,00	0,00	0,00	18,66	2,14	2,50
Грудной отдел	50	8,95	1,94	0,12	2,98	9,25	0,00	0,00	0,00	2,78	1,76	2,22

Таблица 4.4.2.

Органные дозы (мГр), полученные женщиной после прохождения компьютерной томографии в 20 лет (грудной отдел), 25 лет (таз), 30 лет (таз), 45 лет (плечи) и 50 лет (грудной отдел).

Данные получены при помощи программы СТ-Ехро путём обработки стандартных протоколов КТ исследований томографа Siemens Emotion 6

	Возраст при облучении	Пищевод	Желудок	Толстый кишечник	Печень	Лёгкие	Молодая желёза	Линчик	Мочевой пузырь	Щитовидная желёза	Остальные согидные локализации	Красный костный мозг
Грудной отдел	20	9,12	1,85	0,14	2,86	9,22	9,74	0,02	0,00	3,19	2,64	2,29
Таз	25	0,00	1,02	9,96	0,74	0,05	0,03	12,27	13,76	0,00	2,81	4,78
Таз	30	0,00	1,02	9,96	0,74	0,05	0,03	12,27	13,76	0,00	2,81	4,78
Плечи	45	15,14	0,27	0,02	0,36	7,15	1,71	0,00	0,00	21,26	3,59	2,78
Грудной отдел	50	9,12	1,85	0,14	2,86	9,22	9,74	0,02	0,00	3,19	2,64	2,29

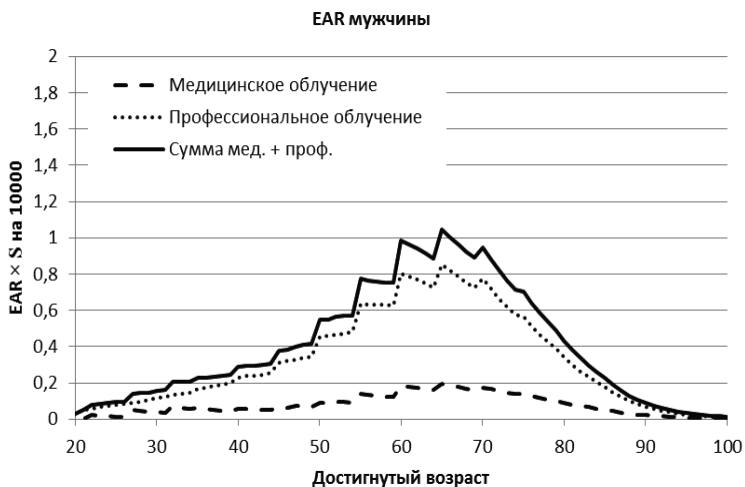


Рис. 4.4.1. Произведение избыточного абсолютного риска (на 10^4 человек) и функции здорового дожития для мужчин как функция достигнутого возраста для заболеваемости всеми раками при медицинском и профессиональном облучениях при расчете риска с 18 лет

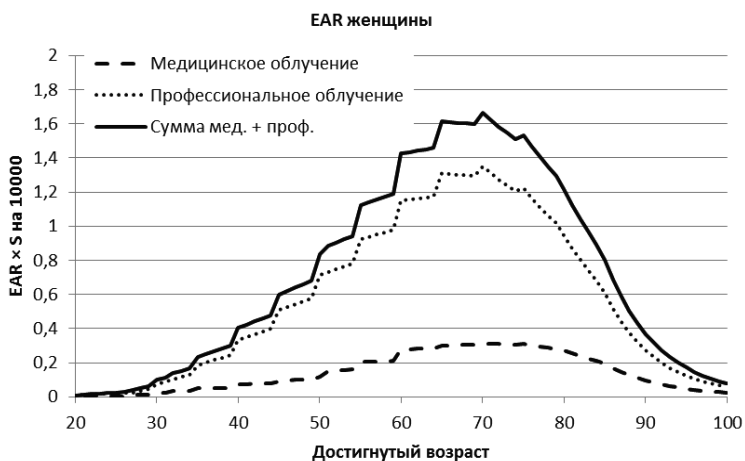


Рис. 4.4.2. Произведение избыточного абсолютного риска (на 10^4 человек) и функции здорового дожития для женщин как функция достигнутого возраста для заболеваемости всеми раками при медицинском и профессиональном облучениях при расчете риска с 18 лет

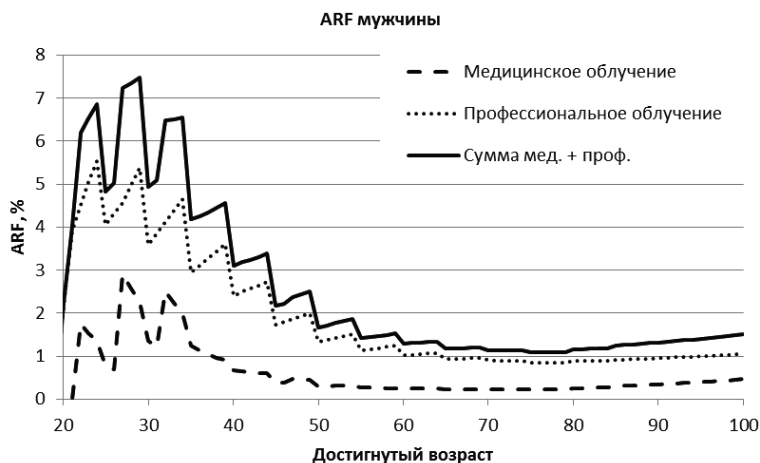


Рис. 4.4.3. Атрибутивная доля (%) как функция достигнутого возраста для заболеваемости всеми раками при медицинском и профессиональном облучениях мужчин при расчете риска с 18 лет

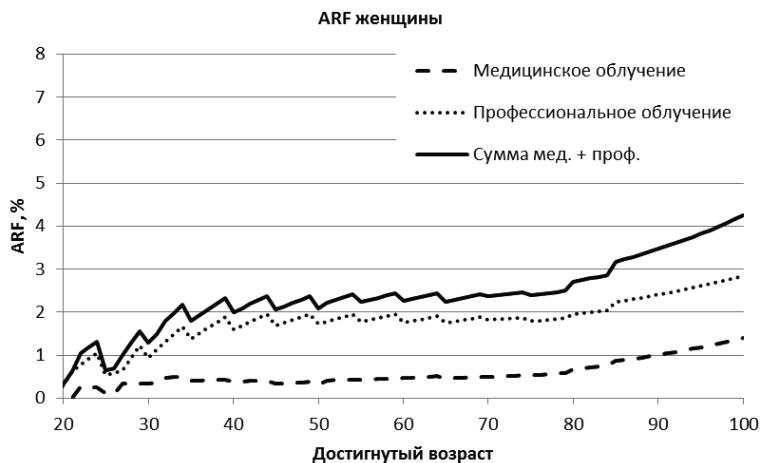


Рис. 4.4.4. Атрибутивная доля (%) как функция достигнутого возраста для заболеваемости всеми раками при медицинском и профессиональном облучениях женщины при расчете риска с 18 лет

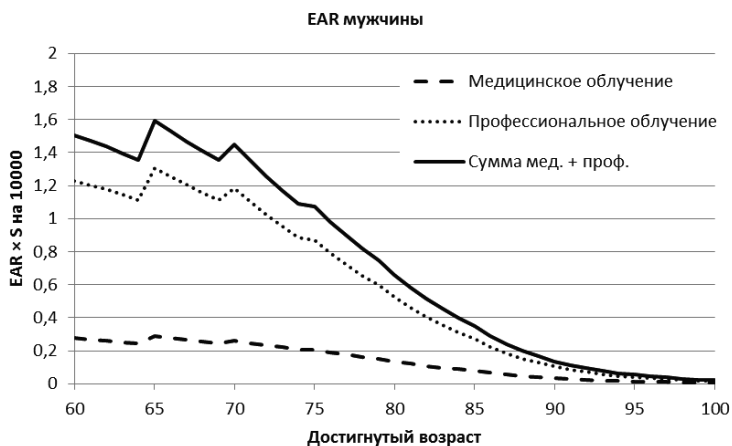


Рис. 4.4.5. Произведение избыточного абсолютного риска (на 10^4 человек) и функции здорового дожития для мужчин как функция достигнутого возраста для заболеваемости всеми раками при медицинском и профессиональном облучениях при расчете риска с 60 лет

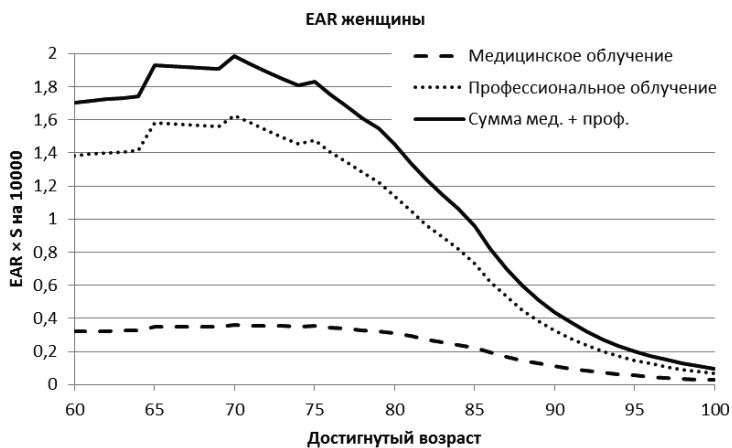


Рис. 4.4.6. Произведение избыточного абсолютного риска (на 10^4 человек) и функции здорового дожития для женщин как функция достигнутого возраста для заболеваемости всеми раками при медицинском и профессиональном облучениях при расчете риска с 60 лет

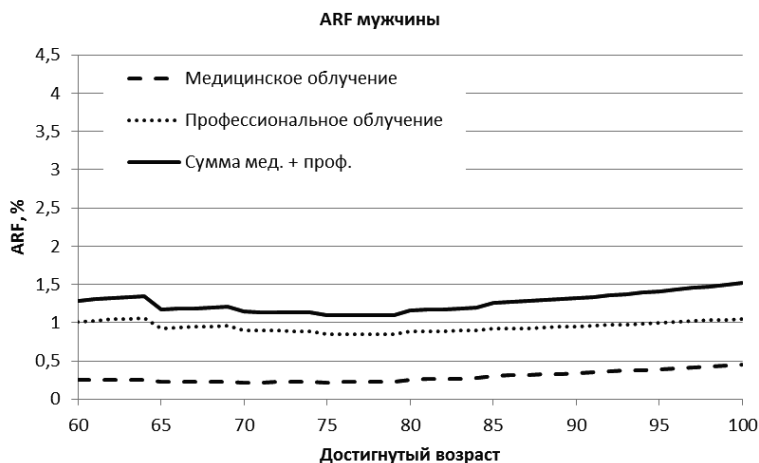


Рис. 4.4.7. Атрибутивная доля (%) как функция достигнутого возраста для заболеваемости всеми раками при медицинском и профессиональном облучениях мужчин при расчете риска с 60 лет

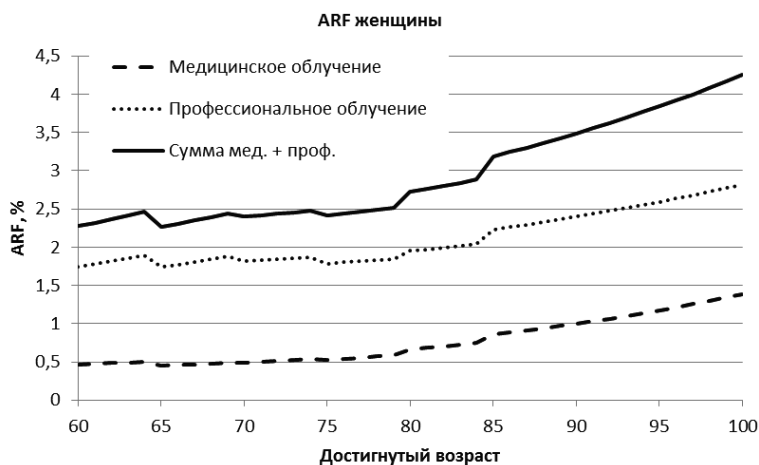


Рис. 4.4.8. Атрибутивная доля (%) как функция достигнутого возраста для заболеваемости всеми раками при медицинском и профессиональном облучениях женщины при расчете риска с 60 лет

Таблица 4.4.3.
Пожизненный атрибутивный риск для случая прогноза с 18 лет

LAR на 10 000 человек (риск с 18 лет)			
	Медицинское	Профессио- нальное	Суммарный риск
Мужчины	6,28	26,43	32,71
Женщины	11,59	46,93	58,53

Таблица 4.4.5.
*Пожизненный коэффициент этиологической доли
для случая прогноза с 18 лет*

LARE, % (риск с 18 лет)			
	Медицинское	Профессио- нальное	Суммарный риск
Мужчины	0,29	1,14	1,45
Женщины	0,51	1,85	2,41

Таблица 4.4.6.
Пожизненный атрибутивный риск для случая прогноза с 60 лет

LAR на 10 000 человек (риск с 60 лет)			
	Медицинское	Профессио- нальное	Суммарный риск
Мужчины	5,70	24,20	29,89
Женщины	9,72	38,70	48,42

Таблица 4.4.7.
Пожизненная атрибутивная доля для случая прогноза с 60 лет

LARE, % (риск с 60 лет)			
	Медицинское	Профессио- нальное	Суммарный риск
Мужчины	0,24	0,93	1,20
Женщины	0,57	1,89	2,54

Полученные результаты дают основу для решения проблемы оптимизации радиационной защиты в ситуациях одновременного профессионального и медицинского облучения. Нами рассмотрены конкретные сценарии облучения. Понятно, что рассмотреть все типовые сценарии крайне сложно – необходимо переходить на оценку радиационных рисков на индивидуальном уровне с учетом динамики во времени профессионального и медицинского облучения. Понятно также, что для реализации такого подхода необходимо создание специального программного обеспечения. Вместе с тем (табл. 4.4.3 – 4.4.7), следует подчеркнуть два важных полученных результата:

- суммарный риск профессионального и медицинского облучения значительно ниже 10 % от спонтанной частоты онкозаболеваний, при котором наблюдаются неблагоприятные радиологические последствия облучения;

- доля радиационного риска медицинского облучения при рассмотренных сценариях составляет 20-30 % от суммарного риска профессионального и медицинского облучения, а это действительно подтверждает необходимость выполнения расчетов комплексной оценки радиационных рисков и оптимизации на этой основе радиационной защиты персонала в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дальнейшее развитие атомной энергетики и промышленности обоснованно занимает приоритетную позицию в среднесрочной и долгосрочной перспективе экономического развития Российской Федерации. При этом, естественно, вопросы радиационной безопасности и радиологической защиты также приобретают особую актуальность.

Идея реализации на практике концепции «социально приемлемого радиационного риска» в последние пять лет получила активную поддержку как в базовых международных документах Научного комитета ООН по действию атомной радиации, Международной комиссии по радиологической защите, МАГАТЭ, так и в принятых недавно в России в Основах государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года.

Действительно, для реализации указанной выше концепции имеются в настоящее время в терминах технических наук как необходимые, так и достаточные условия.

В последние годы в научной литературе были опубликованы законченные крупномасштабные радиационно-эпидемиологические исследования по математическому моделированию зависимости «доза-эффект». К известным базовым моделям Хиросимы-Нагасаки были добавлены исследования по оценке радиационных рисков при профессиональном облучении, по объективной оценке дозовой зависимости медицинских последствий аварии на Чернобыльской АЭС и других радиационных инцидентов, по радиологической защите медицинского облучения. Учет дополнительных важных факторов радиационного риска при облучении позволил давать прогнозные оценки на индивидуальном уровне. К достаточным условиям реализации концепции «социально приемлемого риска» следует отнести современные возможности по оценке индивидуальных

доз облучения с высоким уровнем точности. Как известно, большая степень неопределённости в дозиметрических данных ранее существенно ограничивала практическое применение рискованного подхода для оптимизации радиологической защиты.

Несмотря на выполнение необходимых и достаточных условий для практической реализации концепции «социально приемлемого риска», следует все-таки подчеркнуть, что в ближайшем будущем еще требуется выполнить действительно большой объем работ по внедрению этой технологии для трех категорий облучения (население, персонал, медицинское облучение) и трех ситуаций облучения (существующего, планируемого, аварийного), обозначенных МАГАТЭ в Международных основных нормах безопасности.

Понятно также, что комплексное решение указанных выше проблем имеет большое социально-экономическое значение, определяющее стратегию дальнейшего развития атомной энергетики и промышленности в стране.

Поэтому разработка и внедрение системы АРМИР были направлены лишь на частичное решение указанных выше сложных проблем на примере оптимизации радиационной защиты персонала Госкорпорации «Росатом», состоящего в настоящее время на индивидуальном дозиметрическом контроле.

CONCLUSION

Further development of nuclear power generation industry takes a top position in a mid-term and long-term programs of economic development of the Russian Federation. At the same time, radiological protection and radiation safety become topic issues.

In the last five years the idea for practical application of “socially acceptable risk” is supported and discussed in basic documents of the UN Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation, International Commission on Radiological Protection, International Atomic Energy Agency and in recently adopted Fundamentals of the National Policy in the Field of Nuclear and Radiation Security of the Russian Federation.

Indeed, at present there are necessary and sufficient conditions for turning the idea into reality.

In recent years results of completed large-scale radiation epidemiological studies of mathematical modeling “dose-effect” relationship were published in scientific literature. Results of studies related to the assessment of radiation-associated risks of occupational radiation exposure, adequate estimating dose relationship to health effects of the accident at the Chernobyl NPP and other radiological events, as well as radiation protection in medicine were added to already existing base Hiroshima-Nagasaki models. Consideration of additional important factors of radiation related risks allows estimating an individual’s prognosis. State-of-the-art technologies allowing quantification of individual radiation doses with high precision are related to sufficient conditions for turning the idea of socially acceptable risk into reality. The high level of dose uncertainty is known to limit practical application of risk-based approach to optimization of radiological protection.

Though necessary and sufficient conditions for application of the concept of socially acceptable risk to practice are fulfilled, it is necessary to emphasize that a lot of things should

be made for adaptation of the technology to practical assessment of radiation risks for public, nuclear workers and patients underwent medical radiation exposure, as well as for existing, planned and emergency situations, identified by the International Atomic Energy Agency in the Basic Safety Standards. It is obvious that resolution of above mentioned complex problems is of great social and economic importance and will identify strategy for further development of nuclear power generation industry in Russia.

For this reason the development and introduction of the ARMIR system into practice allows us to solve some complex tasks, such as optimization of radiological protection of the personnel of the State Corporation Rosatom monitored for radiation exposure.

ЛИТЕРАТУРА

- Гигиена труда. Руководство по оценке профессионального риска для здоровья работников. Организационно-методические основы, принципы и критерии оценки. Р2.2.1766-03. М. : Министерство здравоохранения РФ, 2003.
- Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». Отчет по безопасности. М. : Комтехпринт, 2013. С. 23–24.
- Замулаева И.А., Смирнова С.Г., Орлова Н. В., Селиванова Е.И., Андреев В.Г., Саенко А.С.** Повышенная частота мутантных по локусам Т-клеточного рецептора и гликофорина А-клеток как возможный критерий для формирования группы риска онкологических заболеваний // Российский онкологический журнал. 2001. № 1. С. 23–25.
- Злокачественные новообразования в России в 2001 году (заболеваемость и смертность) / под ред. В.И. Чиссова, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М. : МНИОИ им. П.А. Герцена, 2003. 240 с.
- Злокачественные новообразования в России в 2001–2009 гг. (заболеваемость и смертность) : справочник / под ред. акад. РАМН В.И. Чиссова, проф. В.В. Старинского. М., 2000–2009.
- Злокачественные новообразования в России в 2002 году (заболеваемость и смертность) / под ред. В.И. Чиссова, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М. : МНИОИ им. П.А. Герцена, 2004. 256 с.
- Злокачественные новообразования в России в 2004 году (заболеваемость и смертность) / под ред. В.И. Чиссова, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М. : ФГУ МНИОИ им. П.А. Герцена, 2006. 248 с.
- Злокачественные новообразования в России в 2005 году (заболеваемость и смертность) / под ред. В.И. Чиссова, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М. : ФГУ МНИОИ

им. П.А. Герцена, 2007. 252 с.

Злокачественные новообразования в России в 2008 г. (заболеваемость и смертность) : справочник / под ред. В.И. Чиссова, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М., 2009.

Злокачественные новообразования в России в 2012 г. (заболеваемость и смертность) : справочник / под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М., 2014. 249 с.

Иванов В.К. Понятие «дозовой матрицы» в проекте новых рекомендаций МКРЗ : определение групп потенциального канцерогенного риска среди персонала АЭС концерна «Росэнергоатом» // АНРИ. 2005. № 4. С. 14–17.

Иванов В.К., Кайдалов О.В., Кащеева П.В., Корело А.М., Панфилов А.П., Василенко Е.К. Оценка индивидуальных радиационных рисков при различных сценариях профессионального хронического облучения // Радиация и риск. 2008. Т. 17. № 2. С. 9–29.

Иванов В.К., Корело А.М., Максюттов М.А., Туманов К.А., Кащеева П.В., Горский А.И., Меняйло А.Н., Чекин С.Ю., Панфилов А.П., Райков С.В., Михеенко С.Г. Оценка профессиональных радиационных рисков персонала Госкорпорации «Росатом», включённого в систему АРМИР // Радиация и риск. 2012. Т. 21. № 3. С. 60–74.

Иванов В.К., Панфилов А.П., Василенко Е.К., Глазунов С.А., Козлов А.А., Русанов В.А. АРМИР : «международный аудит» состояния обеспечения радиационной безопасности // АНРИ. 2006б. № 4 (47). С. 56–60.

Иванов В.К., Панфилов А.П., Василенко Е.К., Глазунов С.А., Козлов А.А., Русанов В.А. АРМИР : версия 2.0 // АНРИ. 2007. № 2. С. 41–44.

Иванов, В.К., Цыб, А.Ф. Медицинские радиологические последствия Чернобыля для населения России : оценка радиационных рисков. М. : Медицина, 2002. 392 с.

Иванов В.К., Цыб А.Ф., Агапов А.М., Панфилов А.П., Кайдалов О.В., Горский А.И., Максюттов М.А., Чекин С.Ю., Годько А.М., Суспицин Ю.В., Вайзер В.И.,

- Козлов Е.П., Епихин А.И.** Концепция оптимизации системы радиационной защиты в атомной отрасли: управление индивидуальными канцерогенными рисками и оказание адресной медицинской помощи // Радиация и риск. 2004. Спецвыпуск. С. 4–62.
- Иванов В.К., Цыб А.Ф., Василенко Е.К., Панфилов А.П., Кайдалов О.В., Корело А.М., Годько А.М., Туманов К.А., Кашеева П.В.** Определение групп потенциального радиационного риска при хроническом профессиональном облучении : индивидуальный канцерогенный риск среди персонала ПО «Маяк» // Радиационная биология. Радиоэкология. 2006в. Т. 46. № 6. С. 645–653.
- Иванов В.К., Цыб А.Ф., Панфилов А.П., Агапов А.М.** Оптимизация радиационной защиты : «дозовая матрица». М. : Медицина, 2006а. 304 с.
- Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований : методические указания. М. : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. 38 с.
- Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. СанПиН 2.6.1.2523-09. М. : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
- Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). Санитарные правила, СП 2.6.1.2612-10. М. : Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации Минздрава России, 2010. С. 1–8.
- Основополагающие принципы безопасности, серия норм МАГАТЭ № SF-1. Вена : МАГАТЭ, 2007. 23 с.
- Основы государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года. Утверждены Президентом Российской Федерации В. Путиным. Пр-539. 1 марта 2012 г.
- Публикация 103 Международной комиссии по радиацион-

ной защите (МКРЗ) / пер. с англ.; под общей ред. М.Ф. Киселёва и Н.К. Шандалы. М. : Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. 312 с.

Радиационная защита и безопасность источников излучения : Международные основные нормы безопасности. Серия норм МАГАТЭ по безопасности, № GSR Part 3 (Interim). Вена : МАГАТЭ, 2011. 311 с.

Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2012 год (радиационно-гигиенический паспорт РФ). М. : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2013. 130 с.

Саенко А.С., Замулаева И.А. Результаты и перспективы использования методов определения частоты мутантных клеток по локусам гликофорина А и Т-клеточного рецептора для оценки генотоксического действия ионизирующих излучений в отдаленные сроки после воздействия // Радиационная биология. Радиоэкология. 2000. Т. 40. № 5. С. 549–553.

Саенко А.С., Замулаева И.А., Смирнова С.Г., Орлова Н.В., Селиванова Е.И., Матвеева Н.П., Каплан М.А. Соматический мутагенез у облученных в малых дозах лиц в отдаленные сроки после воздействия // Труды регионального конкурса научных проектов в области естественных наук. Калуга : Эйдос, 2003. Вып. 4. С. 233–237.

Akiyama M., Kyoizumi S., Hirai Y., Kusunoki Y., Iwamoto K.S., Nakamura N. Mutation frequency in human blood cells increases with age // Mutat. Res. 1995b. V. 338. P. 141–149.

Akiyama M., Umeki S., Kusunoki Y., Kyoizumi S., Nakamura N., Mori T., Ishikawa Y., Yamakido M., Ohama K., Kodama T. Somatic-cell mutation as a possible predictor of cancer risk // Health Phys. 1995a. V. 68. P. 643–649.

Box G.E.P., Muller M.E. A Note on the Generation of Random Normal Deviates // The Annals of Mathematical Statistics. 1958. V. 29. N. 2. P. 610–611.

- Breslow N.E., Day N.E.** Statistical methods in cancer research. IARC Scientific publications N 32. Lyon, 1980. P. 73–78.
- Clarke R.H.** Radiation protection standards: a practical exercise in risk assessment // Risk Assessment. Session 1-4, Part 1. International Conference, 5-9 October 1992, London. P. 173–182.
- Cole J., Scopek T.R.** Somatic mutant frequency, mutation rates and mutational spectra in the human population in vivo // Mutat. Res. 1994. V. 304. P. 33–105.
- Dean A.G., Sullivan K.M., Soe M.M.** OpenEpi : Open Source Epidemiologic Statistics for Public Health, Version 2.2.1 // URL : www.OpenEpi.com.
- El-Maraghi R.H., Kielar A.Z.** CT colonography versus optical colonoscopy for screening asymptomatic patients for colorectal cancer: a patient, intervention, comparison, outcome (PICO) analysis // Acad. Radiol. 2009. V. 16. N 5. P. 564–571.
- Frauenfelder T., Appenzeller P., Karlo C., Scheffel H., Desbiolles L., Stolzmann P., Marincek B., Alkadhi H., Schertler T.** Triple rule-out CT in the emergency department: protocols and spectrum of imaging findings // Eur. Radiol. 2009. V. 19. N 4. P. 789–799.
- Fujii K., Aoyama T., Koyama S., Kawaura C.** Comparative evaluation of organ and effective doses for paediatric patients with those for adults in chest and abdominal CT examinations // The British Journal of Radio-logy. 2007. V. 80. P. 657–667.
- Fujii K., Aoyama T., Yamauchi-Kawaura C., Koyama S., Yamauchi M., Ko S., Akahane K., Nishizawa K.** Radiation dose evaluation in 64-slice CT examinations with adults and paediatric anthropomorphic phantoms // Br. J. Radiol. 2009. V. 82. P. 1010–1018.
- Grant BW1, Trombley LM, Hunter TC, Nicklas JA, O'Neill JP, Albertini RJ.** HPRT mutations in vivo in human CD34+ hemopoietic stem cells // Mutation Research. 1999. V. 431. P. 183–198.
- <http://www.csrlld.org.uk>.

<http://www.xrayrisk.com>.

Huda W. Dose and image quality in CT // *Pediatr. Radiol.* 2002. V. 32. P. 709–713.

Huda W., Mettler F.A. Volume CT dose index and dose-length product displayed during CT : What good are they? // *Radiology.* 2011. V. 258. N 1. P. 236–242.

IAEA Safety Standards. Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards, General Safety Requirements, No. GSR, Part 3 (Interim). Vienna : IAEA, 2011.

ICRP Publication 101. Assessing dose of the representative person for the purpose of radiation protection and The optimization of radiological protection: Broadening the process // *Annals of the ICRP* / Ed. J.Valentin. Elsevier, 2006.

ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection // *Annals of the ICRP* / Ed. J.Valentin. Elsevier, 2007.

Ivanov V.K. Late cancer and noncancer risks among Chernobyl emergency workers of Russia // *Health Phys.* 2007. V. 93. N 5. P. 470–479.

Ivanov V.K., Tsyb A.F., Agapov A.M., Panfilov A.P., Kaidalov O.V., Gorski A.I., Maksioutov M.A., Suspitsin Y.V., Vaizer V.I. Concept of optimization of the radiation protection system in the nuclear sector : management of individual cancer risks and providing targeted health care // *Journal of Radiation Protection.* 2006. V. 26. P. 361–374.

Ivanov V.K., Tsyb A.F., Ivanov S.I., Pokrovsky V.I. Medical radiological consequences of the Chernobyl catastrophe in Russia : estimation of radiation risks. St. Petersburg : Nauka, 2004. 388 p.

Ivanov V.K., Tsyb A.F., Panfilov A.P., Agapov A.M., Kaidalov O.V., Korelo A.M., Maksioutov M.A., Chekin S.Y., Kashcheyeva P.V. Estimation of individualized radiation risk from chronic occupational exposure in Russia // *Health Physics.* 2009. V. 97. N 1. P. 470–477.

Jessen K.A., Panzer W., Shrimpton P.C., Tosi G., Geleijns J.,

- Bongartz G., Golding S.J., Jurik S.J., Leonardi M., van Meerten E.v.P.** EUR 16262 : European Guidelines on Quality Criteria for Computed Tomography. Paper presented at : Office for Official Publications of the European Communities; Luxembourg, 2000.
- Kyoizumi S., Akiyama M., Hirai Y., Kusunoki Y., Tanabe K., Umeki S.** Spontaneous loss and alteration of antigen receptor expression in mature CD4+ T cells // *J. Exp. Med.* 1990. V. 171. P. 1981–1999.
- Kyoizumi S., Kusunoki Y., Seyama T., Hatamochi A., Goto M.** In vivo somatic mutations in Werner's syndrome // *Hum. Genet.* 1998. V. 103. N 4. P. 405–410.
- Kyoizumi S., Umeki S., Akiyama M., Hirai Y., Kusunoki Y., Nakamura N., Endoh K., Konishi J., Sasaki M.S., Mori T.** Frequency of mutant T lymphocytes defective in the expression of the T-cell antigen receptor gene among radiation-exposed people // *Mutat. Res.* 1992. V. 265. P. 173–180.
- Land C., Gilbert E., Smith J.M.** Report of the NCI-CDC Working Group to Revise the 1985 Radioepidemiological Tables, NIH Publication No. 03-5387. Washington, DC : US Department of Health and Human Services, 2003. 118 p.
- Little J.B.** Radiation-induced genomic instability // *Int. J. Radiat. Biol.* 1998. V. 74. N 6. P. 663–671.
- Loeb L.A.** Mutator phenotype may be required for multistage carcinogenesis // *Cancer Research.* 1991. V. 51. P. 3075–3079.
- McCollough C.H., Guimarães L., Fletcher J.G.** In defense of body CT // *Am. J. Roentgenol.* 2009. V. 193. N 1. P. 28–39.
- Methods for estimating the probability of cancer from occupational radiation exposure. IAEA-TECDOC-870. Vienna, 1996.
- National Academy of Sciences Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation (BEIR). Report VII. Health effects of exposure to low levels of ionizing radiations : time for reassessment? Washington, DC : National Academy of

- Sciences, 2005.
- National Council on Radiation Protection (NCRP). Uncertainties in fatal cancer risk estimates used in radiation protection. NCRP Report No. 126. Bethesda, MD, 1997. 111 p.
- National Research Council, Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations (BEIR VII PHASE 2), Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation. Washington, DC : Natl Acad. Press, 2006.
- OECD Health Data : Health care resources : OECD Health Statistics (database). DOI: 10.1787/ct-exams-tot-table-2013-1-en.
- Ohashi K., El-Khoury G.Y.** Musculoskeletal CT : recent advances and current clinical applications // Radiol. Clin. North. Am. 2009. V. 47. N 3. P. 387–409.
- Pathak S.** Organ- and tissue-specific stem cells and carcinogenesis // Anticancer Research. 2002. V. 22. P. 1353–1356.
- Potential exposure in nuclear safety, INSAG-9. Vienna : IAEA, 1995.
- Preston D.L., Kusumi S., Tomonaga M., Izumi S., Ron E., Kuramoto A., Kamada N., Dohy H., Matsuo T., Nonaka H., Thompson D.E., Soda M., Mabuchi K.** Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part III : Leukemia, lymphoma and multiple myeloma, 1950–1987 // Radiation Research. 1994. V. 137S. P. 68–97.
- Preston D.L., Ron E., Tokuoka S., Funamoto S., Nishi N., Soda M., Mabuchi K., Kodama K.** Solid cancer incidence in atomic bomb survivors : 1958-1998. Radiat. Res., 2007, V. 168, 1–64.
- Radiological Protection in Medicine. ICRP Publication 105 // Annals of the ICRP. 2007. V. 37. N 8. Elsevier, 2007. 63 p.
- Report of the NCI-CDC working group to revise the 1985 NIH Radioepidemiological Tables. National Cancer Institute, National Institute of Health. NIH publication No. 03-5387, 2003. 118 p.
- Schauer D.A., Linton O.W.** NCRP report no. 160, ionizing radiation exposure of the population of the United States, medical exposure: are we doing less with more, and is there a role for health physicists? // Health Phys. 2009. V. 97.

N 1. P. 1–5.

Schmutte C., Fishel R. Genomic instability: first step to carcinogenesis // *Anticancer Research*. 1999. V. 19. P. 4665–4696.

Shrimpton P.C., Hillier M.C., Lewis M.A., Dunn M. National survey of doses from CT in the UK : 2003 // *Br. J. Radiol.* 2006. V. 79. N 948. P. 968–980.

Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. UNSCEAR 1994 report to the General Assembly. New York : UN, 1994.

Stamm G., Nagel H.D. CT-expo: a novel program for dose evaluation in CT // *Rofo*. 2002. V. 174. P. 1570–1576 (in German).

The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 // *Annals of the ICRP*. 2007. V. 37. N 2-4. Elsevier, 2007. 332 p.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and effects of ionizing radiation. 2000 report to the General Assembly, Vol. 2 Effects. New York : United Nation, 2000.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 1994 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. New York : United Nations, 1994.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). UNSCEAR 2006 Report Vol. I: Effects of Ionizing Radiation. New York : United Nations, 2008. P. 216.

Vijg J. Somatic mutations and aging : a re-evaluation // *Mutation Research*. 2000. V. 447. P. 117–135.

Wakeford R. The cancer epidemiology of radiation // *Oncogene*. 2004. V. 23. P. 6404–6428.

Wakeford R., Antell B.A., Leigh W.J. A review of probability of causation and its use in a compensation scheme for nuclear workers in the United Kingdom // *Health Phys.* 1998. V. 74. P. 1–9.

www.cdc.gov/niosh/ocas.

www.gks.ru.

СВОДНЫЕ ДАННЫЕ ПО ПЕРСОНАЛУ ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ», ВКЛЮЧЕННОМУ В СИСТЕМУ АРМИИ

Возрастно-половой состав персонала

Возраст, лет	мужчины		женщины		оба пола	
	абс. число	%	абс. число	%	абс. число	%
все	51988	100	9316	100	61304	100
до 20	73	0,14	4	0,04	77	0,13
20-24	2858	5,5	177	1,9	3035	4,95
25-29	6973	13,41	512	5,5	7485	12,21
30-34	7102	13,66	729	7,83	7831	12,77
35-39	6590	12,68	1097	11,78	7687	12,54
40-44	5591	10,75	1430	15,35	7021	11,45
45-49	6386	12,28	1490	15,99	7876	12,85
50-54	7157	13,77	1878	20,16	9035	14,74
55-59	5140	9,89	1254	13,46	6394	10,43
60-64	2755	5,3	523	5,61	3278	5,35
65-69	902	1,74	173	1,86	1075	1,75
70 +	461	0,89	49	0,53	510	0,83

Численность персонала в зависимости от пола и стажа

Стаж на ИДК, лет	мужчины		женщины		оба пола	
	абс. число	%	абс. число	%	абс. число	%
все	51988	100	9316	100	61304	100
до 10	27852	53,57	5008	53,76	32860	53,60
10-14	9686	18,63	1961	21,05	11647	19,00
15-19	4190	8,06	821	8,81	5011	8,17
20-24	3335	6,41	587	6,30	3922	6,40
25-29	2920	5,62	515	5,53	3435	5,60
30-34	2218	4,27	257	2,76	2475	4,04
35-39	1195	2,30	111	1,19	1306	2,13
40 +	592	1,14	56	0,60	648	1,06

***Абсолютная численность персонала в зависимости
от возраста и стажа. Мужчины***

Возраст, лет	Стаж на ИДК, лет								
	все	до 10	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-39	40 +
все	51988	27852	9686	4190	3335	2920	2218	1195	592
до 20	73	73	0	0	0	0	0	0	0
20-24	2858	2858	0	0	0	0	0	0	0
25-29	6973	6776	197	0	0	0	0	0	0
30-34	7102	5127	1885	90	0	0	0	0	0
35-39	6590	3371	1987	1126	106	0	0	0	0
40-44	5591	2421	1379	913	835	43	0	0	0
45-49	6386	2390	1379	668	939	942	68	0	0
50-54	7157	2416	1389	637	658	1038	887	132	0
55-59	5140	1509	871	442	431	541	776	516	54
60-64	2755	654	445	212	248	262	346	359	229
65-69	902	196	119	77	75	52	97	130	156
70 +	461	61	35	25	43	42	44	58	153

***Относительная (%) численность персонала
в зависимости от возраста и стажа. Мужчины***

Возраст, лет	Стаж на ИДК, лет								
	все	до 10	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-39	40 +
все	100	53,57	18,63	8,06	6,41	5,62	4,27	2,30	1,14
до 20	0,14	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20-24	5,50	5,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25-29	13,41	13,03	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30-34	13,66	9,86	3,63	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
35-39	12,68	6,48	3,82	2,17	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00
40-44	10,75	4,66	2,65	1,76	1,61	0,08	0,00	0,00	0,00
45-49	12,28	4,60	2,65	1,28	1,81	1,81	0,13	0,00	0,00
50-54	13,77	4,65	2,67	1,23	1,27	2,00	1,71	0,25	0,00
55-59	9,89	2,90	1,68	0,85	0,83	1,04	1,49	0,99	0,10
60-64	5,30	1,26	0,86	0,41	0,48	0,50	0,67	0,69	0,44
65-69	1,74	0,38	0,23	0,15	0,14	0,10	0,19	0,25	0,30
70 +	0,89	0,12	0,07	0,05	0,08	0,08	0,08	0,11	0,29

***Абсолютная численность персонала в зависимости
от возраста и стажа. Женщины***

Возраст, лет	Стаж на ИДК, лет								
	все	до 10	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-39	40 +
все	9316	5008	1961	821	587	515	257	111	56
до 20	4	4	0	0	0	0	0	0	0
20-24	177	177	0	0	0	0	0	0	0
25-29	512	510	2	0	0	0	0	0	0
30-34	729	658	71	0	0	0	0	0	0
35-39	1097	818	234	42	3	0	0	0	0
40-44	1430	923	325	125	38	19	0	0	0
45-49	1490	766	386	160	111	57	10	0	0
50-54	1878	684	546	221	190	161	58	18	0
55-59	1254	328	280	199	155	162	91	37	2
60-64	523	105	94	55	72	89	58	34	16
65-69	173	27	22	17	16	23	32	18	18
70 +	49	8	1	2	2	4	8	4	20

***Относительная (%) численность персонала
в зависимости от возраста и стажа. Женщины***

Возраст, лет	Стаж на ИДК, лет								
	все	до 10	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-39	40 +
все	100	53,76	21,05	8,81	6,30	5,53	2,76	1,19	0,60
до 20	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20-24	1,90	1,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25-29	5,50	5,47	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30-34	7,83	7,06	0,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
35-39	11,78	8,78	2,51	0,45	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
40-44	15,35	9,91	3,49	1,34	0,41	0,20	0,00	0,00	0,00
45-49	15,99	8,22	4,14	1,72	1,19	0,61	0,11	0,00	0,00
50-54	20,16	7,34	5,86	2,37	2,04	1,73	0,62	0,19	0,00
55-59	13,46	3,52	3,01	2,14	1,66	1,74	0,98	0,40	0,02
60-64	5,61	1,13	1,01	0,59	0,77	0,96	0,62	0,36	0,17
65-69	1,86	0,29	0,24	0,18	0,17	0,25	0,34	0,19	0,19
70 +	0,53	0,09	0,01	0,02	0,02	0,04	0,09	0,04	0,21

**Абсолютная численность персонала в зависимости
от возраста и стажа. Оба пола**

Возраст, лет	Стаж на ИДК, лет								
	все	до 10	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-39	40 +
все	61304	32860	11647	5011	3922	3435	2475	1306	648
до 20	77	77	0	0	0	0	0	0	0
20-24	3035	3035	0	0	0	0	0	0	0
25-29	7485	7286	199	0	0	0	0	0	0
30-34	7831	5785	1956	90	0	0	0	0	0
35-39	7687	4189	2221	1168	109	0	0	0	0
40-44	7021	3344	1704	1038	873	62	0	0	0
45-49	7876	3156	1765	828	1050	999	78	0	0
50-54	9035	3100	1935	858	848	1199	945	150	0
55-59	6394	1837	1151	641	586	703	867	553	56
60-64	3278	759	539	267	320	351	404	393	245
65-69	1075	223	141	94	91	75	129	148	174
70 +	510	69	36	27	45	46	52	62	173

**Относительная (%) численность персонала
в зависимости от возраста и стажа. Оба пола**

Возраст, лет	Стаж на ИДК, лет								
	все	до 10	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-39	40 +
все	100	53,60	19,00	8,17	6,40	5,60	4,04	2,13	1,06
до 20	0,13	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20-24	4,95	4,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25-29	12,21	11,89	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30-34	12,77	9,44	3,19	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
35-39	12,54	6,83	3,62	1,91	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00
40-44	11,45	5,45	2,78	1,69	1,42	0,10	0,00	0,00	0,00
45-49	12,85	5,15	2,88	1,35	1,71	1,63	0,13	0,00	0,00
50-54	14,74	5,06	3,16	1,40	1,38	1,96	1,54	0,24	0,00
55-59	10,43	3,00	1,88	1,05	0,96	1,15	1,41	0,90	0,09
60-64	5,35	1,24	0,88	0,44	0,52	0,57	0,66	0,64	0,40
65-69	1,75	0,36	0,23	0,15	0,15	0,12	0,21	0,24	0,28
70 +	0,83	0,11	0,06	0,04	0,07	0,08	0,08	0,10	0,28

Численность персонала в зависимости от пола и дозы облучения за отчетный год

Годовая доза, мЗв	мужчины		женщины		оба пола	
	абс. число	%	абс. число	%	абс. число	%
все	51988	100	9316	100	61304	100
до 1	27100	52,13	5447	58,47	32547	53,09
1-1,99	10151	19,53	2191	23,52	12342	20,13
2-4,99	9886	19,02	1471	15,79	11357	18,53
5-19,99	4831	9,29	207	2,22	5038	8,22
20-49,99	19	0,04	0	0,00	19	0,03
50+	1	0,00	0	0,00	1	0,00

Численность персонала в зависимости от пола и накопленной дозы облучения

Накопленная доза, мЗв	мужчины		женщины		оба пола	
	абс. число	%	абс. число	%	абс. число	%
все	51988	100	9316	100	61304	100
до 20	30874	59,39	6589	70,73	37463	61,11
20-49	9068	17,44	1692	18,16	10760	17,55
50-199	9612	18,49	996	10,69	10608	17,30
200-499	2151	4,14	39	0,42	2190	3,57
500-999	277	0,53	0	0,00	277	0,45
1000 +	6	0,01	0	0,00	6	0,01

Абсолютная численность персонала в зависимости от возраста и дозы облучения за отчетный год. Мужчины

Возраст, лет	Годовая доза, мЗв						
	все	до 1	1-1,99	2-4,99	5-19,99	20-49,99	50+
все	51988	27100	10151	9886	4831	19	1
до 20	73	55	11	5	2	0	0
20-24	2858	1516	504	577	259	2	0
25-29	6973	3404	1438	1384	742	4	1
30-34	7102	3498	1516	1373	715	0	0
35-39	6590	3299	1275	1289	723	4	0
40-44	5591	2828	1069	1083	608	3	0
45-49	6386	3250	1243	1250	642	1	0
50-54	7157	3878	1358	1330	588	3	0
55-59	5140	2893	959	906	381	1	0
60-64	2755	1654	500	471	129	1	0
65-69	902	519	197	156	30	0	0
70 +	461	306	81	62	12	0	0

**Относительная (%) численность персонала
в зависимости от возраста и дозы облучения
за отчетный год. Мужчины**

Возраст, лет	Годовая доза, мЗв						
	все	до 1	1-1,99	2-4,99	5-19,99	20-49,99	50+
все	100	52,13	19,53	19,02	9,29	0,04	0,00
до 20	0,14	0,11	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00
20-24	5,50	2,92	0,97	1,11	0,50	0,00	0,00
25-29	13,41	6,55	2,77	2,66	1,43	0,01	0,00
30-34	13,66	6,73	2,92	2,64	1,38	0,00	0,00
35-39	12,68	6,35	2,45	2,48	1,39	0,01	0,00
40-44	10,75	5,44	2,06	2,08	1,17	0,01	0,00
45-49	12,28	6,25	2,39	2,40	1,23	0,00	0,00
50-54	13,77	7,46	2,61	2,56	1,13	0,01	0,00
55-59	9,89	5,56	1,84	1,74	0,73	0,00	0,00
60-64	5,30	3,18	0,96	0,91	0,25	0,00	0,00
65-69	1,74	1,00	0,38	0,30	0,06	0,00	0,00
70 +	0,89	0,59	0,16	0,12	0,02	0,00	0,00

**Абсолютная численность персонала в зависимости от
возраста и дозы облучения за отчетный год. Женщины**

Возраст, лет	Годовая доза, мЗв						
	все	до 1	1-1,99	2-4,99	5-19,99	20-49,99	50+
все	9316	5447	2191	1471	207	0	0
до 20	4	4	0	0	0	0	0
20-24	177	103	38	34	2	0	0
25-29	512	305	135	67	5	0	0
30-34	729	421	180	120	8	0	0
35-39	1097	614	274	185	24	0	0
40-44	1430	779	366	248	37	0	0
45-49	1490	876	354	228	32	0	0
50-54	1878	1132	390	307	49	0	0
55-59	1254	752	287	182	33	0	0
60-64	523	316	110	81	16	0	0
65-69	173	115	42	15	1	0	0
70 +	49	30	15	4	0	0	0

**Относительная (%) численность персонала
в зависимости от возраста и дозы облучения
за отчетный год. Женщины**

Возраст, лет	Годовая доза, мЗв						
	все	до 1	1-1,99	2-4,99	5-19,99	20-49,99	50+
все	100	58,47	23,52	15,79	2,22	0,00	0,00
до 20	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20-24	1,90	1,11	0,41	0,36	0,02	0,00	0,00
25-29	5,50	3,27	1,45	0,72	0,05	0,00	0,00
30-34	7,83	4,52	1,93	1,29	0,09	0,00	0,00
35-39	11,78	6,59	2,94	1,99	0,26	0,00	0,00
40-44	15,35	8,36	3,93	2,66	0,40	0,00	0,00
45-49	15,99	9,40	3,80	2,45	0,34	0,00	0,00
50-54	20,16	12,15	4,19	3,30	0,53	0,00	0,00
55-59	13,46	8,07	3,08	1,95	0,35	0,00	0,00
60-64	5,61	3,39	1,18	0,87	0,17	0,00	0,00
65-69	1,86	1,23	0,45	0,16	0,01	0,00	0,00
70 +	0,53	0,32	0,16	0,04	0,00	0,00	0,00

**Абсолютная численность персонала в зависимости
от возраста и дозы облучения за отчетный год. Оба пола**

Возраст, лет	Годовая доза, мЗв						
	все	до 1	1-1,99	2-4,99	5-19,99	20-49,99	50+
все	61304	32547	12342	11357	5038	19	1
до 20	77	59	11	5	2	0	0
20-24	3035	1619	542	611	261	2	0
25-29	7485	3709	1573	1451	747	4	1
30-34	7831	3919	1696	1493	723	0	0
35-39	7687	3913	1549	1474	747	4	0
40-44	7021	3607	1435	1331	645	3	0
45-49	7876	4126	1597	1478	674	1	0
50-54	9035	5010	1748	1637	637	3	0
55-59	6394	3645	1246	1088	414	1	0
60-64	3278	1970	610	552	145	1	0
65-69	1075	634	239	171	31	0	0
70 +	510	336	96	66	12	0	0

**Относительная (%) численность персонала
в зависимости от возраста и дозы облучения
за отчетный год. Оба пола**

Возраст, лет	Годовая доза, мЗв						
	все	до 1	1-1,99	2-4,99	5-19,99	20-49,99	50+
все	100	53,09	20,13	18,53	8,22	0,03	0,00
до 20	0,13	0,10	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00
20-24	4,95	2,64	0,88	1,00	0,43	0,00	0,00
25-29	12,21	6,05	2,57	2,37	1,22	0,01	0,00
30-34	12,77	6,39	2,77	2,44	1,18	0,00	0,00
35-39	12,54	6,38	2,53	2,40	1,22	0,01	0,00
40-44	11,45	5,88	2,34	2,17	1,05	0,00	0,00
45-49	12,85	6,73	2,61	2,41	1,10	0,00	0,00
50-54	14,74	8,17	2,85	2,67	1,04	0,00	0,00
55-59	10,43	5,95	2,03	1,77	0,68	0,00	0,00
60-64	5,35	3,21	1,00	0,90	0,24	0,00	0,00
65-69	1,75	1,03	0,39	0,28	0,05	0,00	0,00
70 +	0,83	0,55	0,16	0,11	0,02	0,00	0,00

**Абсолютная численность персонала в зависимости
от стажа и дозы облучения за отчетный год. Мужчины**

Стаж на ИДК, лет	Годовая доза, мЗв						
	все	до 1	1-1,99	2-4,99	5-19,99	20-49,99	50+
все	51988	27100	10151	9886	4831	19	1
до 10	27852	16108	5084	4478	2171	10	1
10-14	9686	4536	1872	2183	1088	7	0
15-19	4190	1857	913	945	475	0	0
20-24	3335	1336	716	831	452	0	0
25-29	2920	1216	704	672	326	2	0
30-34	2218	1123	501	400	194	0	0
35-39	1195	585	220	291	99	0	0
40 +	592	339	141	86	26	0	0

**Относительная (%) численность персонала
в зависимости от стажа и дозы облучения
за отчетный год. Мужчины**

Стаж на ИДК, лет	Годовая доза, мЗв						
	все	до 1	1-1,99	2-4,99	5-19,99	20-49,99	50+
все	100	52,13	19,53	19,02	9,29	0,04	0,00
до 10	53,57	30,98	9,78	8,61	4,18	0,02	0,00
10-14	18,63	8,73	3,60	4,20	2,09	0,01	0,00
15-19	8,06	3,57	1,76	1,82	0,91	0,00	0,00
20-24	6,41	2,57	1,38	1,60	0,87	0,00	0,00
25-29	5,62	2,34	1,35	1,29	0,63	0,00	0,00
30-34	4,27	2,16	0,96	0,77	0,37	0,00	0,00
35-39	2,30	1,13	0,42	0,56	0,19	0,00	0,00
40 +	1,14	0,65	0,27	0,17	0,05	0,00	0,00

**Абсолютная численность персонала в зависимости
от стажа и дозы облучения за отчетный год. Женщины**

Стаж на ИДК, лет	Годовая доза, мЗв						
	все	до 1	1-1,99	2-4,99	5-19,99	20-49,99	50+
все	9316	5447	2191	1471	207	0	0
до 10	5008	3125	1116	684	83	0	0
10-14	1961	1101	476	333	51	0	0
15-19	821	456	195	141	29	0	0
20-24	587	305	158	109	15	0	0
25-29	515	257	132	109	17	0	0
30-34	257	135	63	50	9	0	0
35-39	111	38	36	34	3	0	0
40 +	56	30	15	11	0	0	0

**Относительная (%) численность персонала
в зависимости от стажа и дозы облучения
за отчетный год. Женщины**

Стаж на ИДК, лет	Годовая доза, мЗв						
	все	до 1	1-1,99	2-4,99	5-19,99	20-49,99	50+
все	100	58,47	23,52	15,79	2,22	0,00	0,00
до 10	53,76	33,54	11,98	7,34	0,89	0,00	0,00
10-14	21,05	11,82	5,11	3,57	0,55	0,00	0,00
15-19	8,81	4,89	2,09	1,51	0,31	0,00	0,00
20-24	6,30	3,27	1,70	1,17	0,16	0,00	0,00
25-29	5,53	2,76	1,42	1,17	0,18	0,00	0,00
30-34	2,76	1,45	0,68	0,54	0,10	0,00	0,00
35-39	1,19	0,41	0,39	0,36	0,03	0,00	0,00
40 +	0,60	0,32	0,16	0,12	0,00	0,00	0,00

**Абсолютная численность персонала в зависимости
от стажа и дозы облучения за отчетный год. Оба пола**

Стаж на ИДК, лет	Годовая доза, мЗв						
	все	до 1	1-1,99	2-4,99	5-19,99	20-49,99	50+
все	61304	32547	12342	11357	5038	19	1
до 10	32860	19233	6200	5162	2254	10	1
10-14	11647	5637	2348	2516	1139	7	0
15-19	5011	2313	1108	1086	504	0	0
20-24	3922	1641	874	940	467	0	0
25-29	3435	1473	836	781	343	2	0
30-34	2475	1258	564	450	203	0	0
35-39	1306	623	256	325	102	0	0
40 +	648	369	156	97	26	0	0

**Относительная (%) численность персонала
в зависимости от стажа и дозы облучения
за отчетный год. Оба пола**

Стаж на ИДК, лет	Годовая доза, мЗв						
	все	до 1	1-1,99	2-4,99	5-19,99	20- 49,99	50+
все	100	53,09	20,13	18,53	8,22	0,03	0,00
до 10	53,60	31,37	10,11	8,42	3,68	0,02	0,00
10-14	19,00	9,20	3,83	4,10	1,86	0,01	0,00
15-19	8,17	3,77	1,81	1,77	0,82	0,00	0,00
20-24	6,40	2,68	1,43	1,53	0,76	0,00	0,00
25-29	5,60	2,40	1,36	1,27	0,56	0,00	0,00
30-34	4,04	2,05	0,92	0,73	0,33	0,00	0,00
35-39	2,13	1,02	0,42	0,53	0,17	0,00	0,00
40 +	1,06	0,60	0,25	0,16	0,04	0,00	0,00

**Абсолютная численность персонала в зависимости от
возраста и накопленной дозы облучения. Мужчины**

Возраст, лет	Накопленная доза, мЗв						
	все	до 20	20-49	50-199	200-499	500-999	1000+
все	51988	30874	9068	9612	2151	277	6
до 20	73	73	0	0	0	0	0
20-24	2858	2724	120	14	0	0	0
25-29	6973	5936	855	182	0	0	0
30-34	7102	5251	1180	669	2	0	0
35-39	6590	4049	1426	1064	51	0	0
40-44	5591	3045	1243	1142	155	6	0
45-49	6386	3084	1311	1573	388	30	0
50-54	7157	3238	1260	1999	584	75	1
55-59	5140	2106	872	1562	518	80	2
60-64	2755	981	505	909	301	59	0
65-69	902	289	201	296	95	20	1
70 +	461	98	95	202	57	7	2

**Относительная (%) численность персонала
в зависимости от возраста и дозы облучения
за отчетный год. Мужчины**

Возраст, лет	Накопленная доза, мЗв						
	все	до 20	20-49	50-199	200-499	500-999	1000+
все	100	59,39	17,44	18,49	4,14	0,53	0,01
до 20	0,14	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20-24	5,50	5,24	0,23	0,03	0,00	0,00	0,00
25-29	13,41	11,42	1,64	0,35	0,00	0,00	0,00
30-34	13,66	10,10	2,27	1,29	0,00	0,00	0,00
35-39	12,68	7,79	2,74	2,05	0,10	0,00	0,00
40-44	10,75	5,86	2,39	2,20	0,30	0,01	0,00
45-49	12,28	5,93	2,52	3,03	0,75	0,06	0,00
50-54	13,77	6,23	2,42	3,85	1,12	0,14	0,00
55-59	9,89	4,05	1,68	3,00	1,00	0,15	0,00
60-64	5,30	1,89	0,97	1,75	0,58	0,11	0,00
65-69	1,74	0,56	0,39	0,57	0,18	0,04	0,00
70 +	0,89	0,19	0,18	0,39	0,11	0,01	0,00

**Абсолютная численность персонала в зависимости
от возраста и накопленной дозы облучения. Женщины**

Возраст, лет	Накопленная доза, мЗв						
	все	до 20	20-49	50-199	200-499	500-999	1000+
все	9316	6589	1692	996	39	0	0
до 20	4	4	0	0	0	0	0
20-24	177	177	0	0	0	0	0
25-29	512	493	19	0	0	0	0
30-34	729	679	50	0	0	0	0
35-39	1097	962	124	11	0	0	0
40-44	1430	1139	232	58	1	0	0
45-49	1490	1055	321	113	1	0	0
50-54	1878	1151	430	287	10	0	0
55-59	1254	637	309	293	15	0	0
60-64	523	211	146	161	5	0	0
65-69	173	69	46	52	6	0	0
70 +	49	12	15	21	1	0	0

**Относительная (%) численность персонала
в зависимости от возраста и дозы облучения
за отчетный год. Женщины**

Возраст, лет	Накопленная доза, мЗв						
	все	до 20	20-49	50-199	200-499	500-999	1000+
все	100	70,73	18,16	10,69	0,42	0,00	0,00
до 20	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20-24	1,90	1,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25-29	5,50	5,29	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00
30-34	7,83	7,29	0,54	0,00	0,00	0,00	0,00
35-39	11,78	10,33	1,33	0,12	0,00	0,00	0,00
40-44	15,35	12,23	2,49	0,62	0,01	0,00	0,00
45-49	15,99	11,32	3,45	1,21	0,01	0,00	0,00
50-54	20,16	12,36	4,62	3,08	0,11	0,00	0,00
55-59	13,46	6,84	3,32	3,15	0,16	0,00	0,00
60-64	5,61	2,26	1,57	1,73	0,05	0,00	0,00
65-69	1,86	0,74	0,49	0,56	0,06	0,00	0,00
70 +	0,53	0,13	0,16	0,23	0,01	0,00	0,00

**Абсолютная численность персонала в зависимости
от возраста и накопленной дозы облучения. Оба пола**

Возраст, лет	Накопленная доза, мЗв						
	все	до 20	20-49	50-199	200-499	500-999	1000+
все	61304	37463	10760	10608	2190	277	6
до 20	77	77	0	0	0	0	0
20-24	3035	2901	120	14	0	0	0
25-29	7485	6429	874	182	0	0	0
30-34	7831	5930	1230	669	2	0	0
35-39	7687	5011	1550	1075	51	0	0
40-44	7021	4184	1475	1200	156	6	0
45-49	7876	4139	1632	1686	389	30	0
50-54	9035	4389	1690	2286	594	75	1
55-59	6394	2743	1181	1855	533	80	2
60-64	3278	1192	651	1070	306	59	0
65-69	1075	358	247	348	101	20	1
70 +	510	110	110	223	58	7	2

**Относительная (%) численность персонала
в зависимости от возраста и дозы облучения
за отчетный год. Оба пола**

Возраст, лет	Накопленная доза, мЗв						
	все	до 20	20-49	50-199	200-499	500-999	1000+
все	100	61,11	17,55	17,30	3,57	0,45	0,01
до 20	0,13	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20-24	4,95	4,73	0,20	0,02	0,00	0,00	0,00
25-29	12,21	10,49	1,43	0,30	0,00	0,00	0,00
30-34	12,77	9,67	2,01	1,09	0,00	0,00	0,00
35-39	12,54	8,17	2,53	1,75	0,08	0,00	0,00
40-44	11,45	6,83	2,41	1,96	0,25	0,01	0,00
45-49	12,85	6,75	2,66	2,75	0,63	0,05	0,00
50-54	14,74	7,16	2,76	3,73	0,97	0,12	0,00
55-59	10,43	4,47	1,93	3,03	0,87	0,13	0,00
60-64	5,35	1,94	1,06	1,75	0,50	0,10	0,00
65-69	1,75	0,58	0,40	0,57	0,16	0,03	0,00
70 +	0,83	0,18	0,18	0,36	0,09	0,01	0,00

**Абсолютная численность персонала в зависимости
от стажа и накопленной дозы облучения. Мужчины**

Стаж на ИДК, лет	Накопленная доза, мЗв						
	все	до 20	20-49	50-199	200-499	500-999	1000+
все	51988	30874	9068	9612	2151	277	6
до 10	27852	24740	2466	646	0	0	0
10-14	9686	4764	2818	2075	28	1	0
15-19	4190	1003	1639	1434	113	1	0
20-24	3335	296	1117	1419	488	15	0
25-29	2920	58	638	1595	559	70	0
30-34	2218	11	261	1364	482	99	1
35-39	1195	2	104	707	320	59	3
40 +	592	0	25	372	161	32	2

**Относительная (%) численность персонала
в зависимости от стажа и дозы облучения
за отчетный год. Мужчины**

Стаж на ИДК, лет	Накопленная доза, мЗв						
	все	до 20	20-49	50-199	200-499	500-999	1000+
все	100	59,39	17,44	18,49	4,14	0,53	0,01
до 10	53,57	47,59	4,74	1,24	0,00	0,00	0,00
10-14	18,63	9,16	5,42	3,99	0,05	0,00	0,00
15-19	8,06	1,93	3,15	2,76	0,22	0,00	0,00
20-24	6,41	0,57	2,15	2,73	0,94	0,03	0,00
25-29	5,62	0,11	1,23	3,07	1,08	0,13	0,00
30-34	4,27	0,02	0,50	2,62	0,93	0,19	0,00
35-39	2,30	0,00	0,20	1,36	0,62	0,11	0,01
40 +	1,14	0,00	0,05	0,72	0,31	0,06	0,00

**Абсолютная численность персонала в зависимости
от стажа и накопленной дозы облучения. Женщины**

Стаж на ИДК, лет	Накопленная доза, мЗв						
	все	до 20	20-49	50-199	200-499	500-999	1000+
все	9316	6589	1692	996	39	0	0
до 10	5008	4799	203	6	0	0	0
10-14	1961	1322	577	62	0	0	0
15-19	821	384	337	98	2	0	0
20-24	587	63	326	194	4	0	0
25-29	515	12	181	314	8	0	0
30-34	257	8	49	192	8	0	0
35-39	111	1	15	87	8	0	0
40 +	56	0	4	43	9	0	0

**Относительная (%) численность персонала
в зависимости от стажа и дозы облучения
за отчетный год. Женщины**

Стаж на ИДК, лет	Накопленная доза, мЗв						
	все	до 20	20-49	50-199	200-499	500-999	1000+
все	100	70,73	18,16	10,69	0,42	0,00	0,00
до 10	53,76	51,51	2,18	0,06	0,00	0,00	0,00
10-14	21,05	14,19	6,19	0,67	0,00	0,00	0,00
15-19	8,81	4,12	3,62	1,05	0,02	0,00	0,00
20-24	6,30	0,68	3,50	2,08	0,04	0,00	0,00
25-29	5,53	0,13	1,94	3,37	0,09	0,00	0,00
30-34	2,76	0,09	0,53	2,06	0,09	0,00	0,00
35-39	1,19	0,01	0,16	0,93	0,09	0,00	0,00
40 +	0,60	0,00	0,04	0,46	0,10	0,00	0,00

**Абсолютная численность персонала в зависимости
от стажа и накопленной дозы облучения. Оба пола**

Стаж на ИДК, лет	Накопленная доза, мЗв						
	все	до 20	20-49	50-199	200-499	500-999	1000+
все	61304	37463	10760	10608	2190	277	6
до 10	32860	29539	2669	652	0	0	0
10-14	11647	6086	3395	2137	28	1	0
15-19	5011	1387	1976	1532	115	1	0
20-24	3922	359	1443	1613	492	15	0
25-29	3435	70	819	1909	567	70	0
30-34	2475	19	310	1556	490	99	1
35-39	1306	3	119	794	328	59	3
40 +	648	0	29	415	170	32	2

**Относительная (%) численность персонала
в зависимости от стажа и дозы облучения
за отчетный год. Оба пола**

Стаж на ИДК, лет	Накопленная доза, мЗв						
	все	до 20	20-49	50-199	200-499	500-999	1000+
все	100	61,11	17,55	17,30	3,57	0,45	0,01
до 10	53,60	48,18	4,35	1,06	0,00	0,00	0,00
10-14	19,00	9,93	5,54	3,49	0,05	0,00	0,00
15-19	8,17	2,26	3,22	2,50	0,19	0,00	0,00
20-24	6,40	0,59	2,35	2,63	0,80	0,02	0,00
25-29	5,60	0,11	1,34	3,11	0,92	0,11	0,00
30-34	4,04	0,03	0,51	2,54	0,80	0,16	0,00
35-39	2,13	0,00	0,19	1,30	0,54	0,10	0,00
40 +	1,06	0,00	0,05	0,68	0,28	0,05	0,00

**Основные характеристики персонала
по группам предприятий ГК «Росатом». Мужчины**

Наименование группы предприятий	Числен- ность	Средний возраст, лет	Средняя доза за год, мЗв	Средняя накоплен- ная доза, мЗв	Средний стаж на ИДК, лет
РОСАТОМ	51988	42,1	1,86	43,4	11,45
РОСЭНЕРГОАТОМ	23377	41,7	1,78	53,8	10,83
ТВЭЛ	7918	42,6	1,19	22,3	10,8
АТОМРЕДМЕТЗОЛОТО	3226	36,7	3,74	37,6	6,77
ЯДЕРНЫЙ ОРУЖЕЙНЫЙ КОМПЛЕКС	11305	42,3	1,98	36	12
ЯДЕРНАЯ И РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ	2311	44,1	0,8	41,8	15,81
БЛОК ПО УПРАВЛЕНИЮ ИННОВАЦИЯМИ	3540	47,1	2,45	52,5	16,66
КАПИТАЛЬНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО	17	53,9	1,47	60,3	19,76
АТОМЭНЕРГОМАШ	229	39,3	1,21	25,3	9,93
ПРОЧИЕ	65	50	1,1	14,3	8,89

***Основные характеристики персонала
по группам предприятий ГК «Росатом». Женщины***

Наименование группы предприятий	Численность	Средний возраст, лет	Средняя доза за год, мЗв	Средняя накопленная доза, мЗв	Средний стаж на ИДК, лет
РОСАТОМ	9316	46	1,18	20,4	11,02
РОСЭНЕРГОАТОМ	2183	48	0,78	24,3	13,15
ТВЭЛ	2042	45,9	0,78	13,8	9,69
АТОМРЕДМЕТЗОЛОТО	400	41,5	2,35	18,2	6,84
ЯДЕРНЫЙ ОРУЖЕЙНЫЙ КОМПЛЕКС	3217	43,8	1,7	23,2	10,13
ЯДЕРНАЯ И РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ	395	48	0,75	20,9	14,7
БЛОК ПО УПРАВЛЕНИЮ ИННОВАЦИЯМИ	1010	49,7	0,94	16,7	12,18
КАПИТАЛЬНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО	6	48,3	1,62	31,6	11,5
АТОМЭНЕРГОМАШ	45	43,6	1,11	19,2	10,24
ПРОЧИЕ	18	50,1	0,81	12,8	9,78

***Основные характеристики персонала
по группам предприятий ГК «Росатом». Оба пола***

Наименование группы предприятий	Численность	Средний возраст, лет	Средняя доза за год, мЗв	Средняя накопленная доза, мЗв	Средний стаж на ИДК, лет
РОСАТОМ	61304	42,7	1,75	39,9	11,4
РОСЭНЕРГОАТОМ	25560	42,2	1,70	51,3	11,0
ТВЭЛ	9960	43,2	1,11	20,6	10,6
АТОМРЕДМЕТЗОЛОТО	3626	37,2	3,58	35,5	6,7
ЯДЕРНЫЙ ОРУЖЕЙНЫЙ КОМПЛЕКС	14522	42,6	1,92	33,2	11,6
ЯДЕРНАЯ И РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ	2706	44,6	0,79	38,8	15,7
БЛОК ПО УПРАВЛЕНИЮ ИННОВАЦИЯМИ	4550	47,7	2,12	44,6	15,7
КАПИТАЛЬНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО	23	52,4	1,51	52,8	17,6
АТОМЭНЕРГОМАШ	274	40,0	1,20	24,3	10,0
ПРОЧИЕ	83	50,0	1,04	14,0	9,1

***Средний риск персонала в зависимости от возраста
и стажа. Мужчины***

Возраст, лет	Стаж на ИДК, лет								
	все	до 10	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-39	40 +
все	8,2E-05	2,5E-06	2,1E-05	5,3E-05	1,5E-04	2,8E-04	4,7E-04	7,0E-04	9,9E-04
до 20	0,0E+00	0,0E+00	-	-	-	-	-	-	-
20-24	9,1E-07	9,1E-07	-	-	-	-	-	-	-
25-29	3,0E-06	2,7E-06	1,2E-05	-	-	-	-	-	-
30-34	6,5E-06	3,2E-06	1,4E-05	3,0E-05	-	-	-	-	-
35-39	1,3E-05	2,9E-06	1,7E-05	3,1E-05	6,5E-05	-	-	-	-
40-44	2,6E-05	2,6E-06	1,8E-05	3,7E-05	9,3E-05	1,0E-04	-	-	-
45-49	6,6E-05	1,8E-06	2,3E-05	4,8E-05	1,3E-04	2,2E-04	2,9E-04	-	-
50-54	1,4E-04	1,5E-06	3,0E-05	7,7E-05	1,9E-04	2,9E-04	4,3E-04	5,3E-04	-
55-59	2,2E-04	2,1E-06	3,3E-05	9,0E-05	2,1E-04	3,3E-04	5,2E-04	6,7E-04	5,4E-04
60-64	3,1E-04	1,7E-06	3,3E-05	9,0E-05	2,5E-04	3,7E-04	5,3E-04	7,8E-04	9,3E-04
65-69	4,1E-04	9,0E-06	3,1E-05	9,3E-05	1,8E-04	3,1E-04	4,7E-04	7,5E-04	1,2E-03
70 +	5,2E-04	3,0E-05	2,3E-05	6,8E-05	1,2E-04	1,7E-04	4,4E-04	6,9E-04	1,1E-03

***Средний риск персонала в зависимости от возраста
и стажа. Женщины***

Возраст, лет	Стаж на ИДК, лет								
	все	до 10	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-39	40 +
все	4,2E-05	2,9E-07	1,2E-05	4,3E-05	1,1E-04	2,0E-04	3,1E-04	4,3E-04	6,7E-04
до 20	0,0E+00	0,0E+00	-	-	-	-	-	-	-
20-24	0,0E+00	0,0E+00	-	-	-	-	-	-	-
25-29	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	-	-	-	-	-	-
30-34	2,5E-07	1,5E-08	2,4E-06	-	-	-	-	-	-
35-39	2,0E-06	7,3E-08	4,7E-06	2,1E-05	3,7E-05	-	-	-	-
40-44	8,8E-06	3,3E-07	8,2E-06	3,1E-05	8,4E-05	1,4E-04	-	-	-
45-49	2,5E-05	5,0E-07	1,2E-05	3,8E-05	1,0E-04	2,0E-04	3,1E-04	-	-
50-54	5,7E-05	5,4E-07	1,5E-05	4,7E-05	1,2E-04	2,2E-04	3,5E-04	4,2E-04	-
55-59	9,3E-05	7,3E-07	1,8E-05	5,5E-05	1,2E-04	2,1E-04	3,4E-04	4,7E-04	2,6E-04
60-64	1,4E-04	6,7E-07	1,9E-05	5,3E-05	9,8E-05	2,0E-04	2,9E-04	4,1E-04	6,9E-04
65-69	2,1E-04	3,7E-07	5,5E-06	3,0E-05	6,6E-05	1,3E-04	2,4E-04	4,3E-04	8,7E-04
70 +	2,7E-04	0,0E+00	2,0E-05	2,5E-05	8,0E-05	1,1E-04	1,3E-04	2,4E-04	5,1E-04

***Средний риск персонала в зависимости от возраста
и стажа. Оба пола***

Возраст, лет	Стаж на ИДК, лет								
	все	до 10	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-39	40 +
все	7,6E-05	2,1E-06	2,0E-05	5,1E-05	1,4E-04	2,7E-04	4,6E-04	6,7E-04	9,6E-04
до 20	0,0E+00	0,0E+00	-	-	-	-	-	-	-
20-24	8,5E-07	8,5E-07	-	-	-	-	-	-	-
25-29	2,8E-06	2,5E-06	1,2E-05	-	-	-	-	-	-
30-34	5,9E-06	2,8E-06	1,4E-05	3,0E-05	-	-	-	-	-
35-39	1,1E-05	2,4E-06	1,5E-05	3,0E-05	6,5E-05	-	-	-	-
40-44	2,3E-05	2,0E-06	1,6E-05	3,6E-05	9,2E-05	1,1E-04	-	-	-
45-49	5,8E-05	1,4E-06	2,0E-05	4,6E-05	1,3E-04	2,2E-04	2,9E-04	-	-
50-54	1,2E-04	1,3E-06	2,5E-05	7,0E-05	1,7E-04	2,8E-04	4,3E-04	5,2E-04	-
55-59	1,9E-04	1,8E-06	2,9E-05	7,9E-05	1,9E-04	3,0E-04	5,0E-04	6,6E-04	5,3E-04
60-64	2,9E-04	1,6E-06	3,0E-05	8,2E-05	2,2E-04	3,3E-04	4,9E-04	7,5E-04	9,1E-04
65-69	3,8E-04	7,9E-06	2,7E-05	8,2E-05	1,6E-04	2,5E-04	4,1E-04	7,1E-04	1,1E-03
70 +	5,0E-04	2,7E-05	2,3E-05	6,4E-05	1,2E-04	1,7E-04	4,0E-04	6,6E-04	1,0E-03

***Максимальный риск персонала в зависимости
от возраста и стажа. Мужчины***

Возраст, лет	Стаж на ИДК, лет								
	все	до 10	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-39	40 +
все	6,9E-03	1,2E-03	8,0E-04	1,7E-03	2,2E-03	2,9E-03	3,1E-03	6,9E-03	6,7E-03
до 20	0,0E+00	0,0E+00	-	-	-	-	-	-	-
20-24	4,0E-05	4,0E-05	-	-	-	-	-	-	-
25-29	9,0E-05	9,0E-05	7,0E-05	-	-	-	-	-	-
30-34	1,4E-04	7,0E-05	1,1E-04	1,4E-04	-	-	-	-	-
35-39	3,0E-04	8,0E-05	2,6E-04	1,9E-04	3,0E-04	-	-	-	-
40-44	5,9E-04	1,0E-04	1,7E-04	3,0E-04	5,9E-04	4,1E-04	-	-	-
45-49	1,3E-03	1,1E-04	2,4E-04	3,3E-04	7,1E-04	1,3E-03	1,3E-03	-	-
50-54	2,8E-03	1,5E-04	5,2E-04	7,9E-04	1,5E-03	1,8E-03	2,5E-03	2,8E-03	-
55-59	3,9E-03	5,4E-04	7,0E-04	1,6E-03	2,2E-03	2,1E-03	2,9E-03	3,9E-03	2,5E-03
60-64	4,8E-03	1,9E-04	4,3E-04	1,7E-03	2,1E-03	2,4E-03	3,1E-03	3,9E-03	4,8E-03
65-69	6,9E-03	1,1E-03	8,0E-04	1,2E-03	1,6E-03	2,9E-03	2,8E-03	6,9E-03	5,3E-03
70 +	6,7E-03	1,2E-03	9,0E-05	4,7E-04	6,4E-04	6,5E-04	2,7E-03	2,5E-03	6,7E-03

**Максимальный риск персонала в зависимости
от возраста и стажа. Женщины**

Возраст, лет	Стаж на ИДК, лет								
	все	до 10	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-39	40 +
все	2,6E-03	7,0E-05	2,0E-04	5,8E-04	7,6E-04	1,3E-03	1,1E-03	1,2E-03	2,6E-03
до 20	0,0E+00	0,0E+00	-	-	-	-	-	-	-
20-24	0,0E+00	0,0E+00	-	-	-	-	-	-	-
25-29	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	-	-	-	-	-	-
30-34	4,0E-05	1,0E-05	4,0E-05	-	-	-	-	-	-
35-39	8,0E-05	1,0E-05	8,0E-05	6,0E-05	6,0E-05	-	-	-	-
40-44	4,0E-04	7,0E-05	1,2E-04	1,6E-04	4,0E-04	3,1E-04	-	-	-
45-49	5,8E-04	2,0E-05	1,0E-04	2,1E-04	5,8E-04	3,9E-04	3,7E-04	-	-
50-54	1,0E-03	5,0E-05	2,0E-04	3,9E-04	4,8E-04	9,9E-04	9,3E-04	1,0E-03	-
55-59	1,2E-03	5,0E-05	1,9E-04	5,8E-04	7,6E-04	7,7E-04	1,1E-03	1,2E-03	3,2E-04
60-64	1,7E-03	2,0E-05	9,0E-05	3,6E-04	2,8E-04	1,3E-03	7,5E-04	1,1E-03	1,7E-03
65-69	2,6E-03	1,0E-05	2,0E-05	8,0E-05	2,2E-04	2,6E-04	6,2E-04	1,1E-03	2,6E-03
70 +	1,5E-03	0,0E+00	2,0E-05	3,0E-05	8,0E-05	2,4E-04	4,6E-04	4,4E-04	1,5E-03

**Максимальный риск персонала в зависимости
от возраста и стажа. Оба пола**

Возраст, лет	Стаж на ИДК, лет								
	все	до 10	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-39	40 +
все	6,9E-03	1,2E-03	8,0E-04	1,7E-03	2,2E-03	2,9E-03	3,1E-03	6,9E-03	6,7E-03
до 20	0,0E+00	0,0E+00	-	-	-	-	-	-	-
20-24	4,0E-05	4,0E-05	-	-	-	-	-	-	-
25-29	9,0E-05	9,0E-05	7,0E-05	-	-	-	-	-	-
30-34	1,4E-04	7,0E-05	1,1E-04	1,4E-04	-	-	-	-	-
35-39	3,0E-04	8,0E-05	2,6E-04	1,9E-04	3,0E-04	-	-	-	-
40-44	5,9E-04	1,0E-04	1,7E-04	3,0E-04	5,9E-04	4,1E-04	-	-	-
45-49	1,3E-03	1,1E-04	2,4E-04	3,3E-04	7,1E-04	1,3E-03	1,3E-03	-	-
50-54	2,8E-03	1,5E-04	5,2E-04	7,9E-04	1,5E-03	1,8E-03	2,5E-03	2,8E-03	-
55-59	3,9E-03	5,4E-04	7,0E-04	1,6E-03	2,2E-03	2,1E-03	2,9E-03	3,9E-03	2,5E-03
60-64	4,8E-03	1,9E-04	4,3E-04	1,7E-03	2,1E-03	2,4E-03	3,1E-03	3,9E-03	4,8E-03
65-69	6,9E-03	1,1E-03	8,0E-04	1,2E-03	1,6E-03	2,9E-03	2,8E-03	6,9E-03	5,3E-03
70 +	6,7E-03	1,2E-03	9,0E-05	4,7E-04	6,4E-04	6,5E-04	2,7E-03	2,5E-03	6,7E-03

***Средние и максимальные риска персонала
по полу и группам предприятий ГК «Росатом»***

Наименование группы предприятий	Средний риск			Максимальный риск		
	мужчины	женщины	оба пола	мужчины	женщины	оба пола
РОСАТОМ	8,24E-05	4,24E-05	7,63E-05	6,94E-03	2,60E-03	6,94E-03
РОСЭНЕРГОАТОМ	1,06E-04	6,38E-05	1,02E-04	6,10E-03	2,60E-03	6,10E-03
ТВЭЛ	3,59E-05	2,55E-05	3,38E-05	6,94E-03	8,70E-04	6,94E-03
АТОМРЕДМЕТЗ ОЛОТО	2,17E-05	1,17E-05	2,06E-05	2,20E-04	1,00E-04	2,20E-04
ЯДЕРНЫЙ ОРУЖЕЙНЫЙ КОМПЛЕКС	6,43E-05	4,19E-05	5,93E-05	6,66E-03	2,03E-03	6,66E-03
ЯДЕРНАЯ И РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ	1,09E-04	6,24E-05	1,02E-04	4,38E-03	1,11E-03	4,38E-03
БЛОК ПО УПРАВЛЕНИЮ ИННОВАЦИЯМИ	1,30E-04	3,59E-05	1,09E-04	3,16E-03	1,54E-03	3,16E-03
КАПИТАЛЬНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО	1,79E-04	9,00E-05	1,56E-04	1,34E-03	3,30E-04	1,34E-03
АТОМЭНЕРГОМАШ	7,53E-05	5,36E-05	7,18E-05	1,59E-03	6,20E-04	1,59E-03
ПРОЧИЕ	1,34E-05	1,67E-05	1,41E-05	2,90E-04	1,60E-04	2,90E-04

***Численность персонала из группы повышенного риска
в зависимости от возраста и стажа. Мужчины***

Возраст, лет	Стаж на ИДК, лет								
	все	до 10	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-39	40 +
все	752	0	0	5	16	81	230	242	178
до 20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20-24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25-29	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30-34	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35-39	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40-44	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45-49	13	0	0	0	0	11	2	0	0
50-54	119	0	0	0	1	32	69	17	0
55-59	232	0	0	1	6	19	95	106	5
60-64	225	0	0	1	8	18	47	83	68
65-69	104	0	0	2	1	1	13	25	62
70 +	59	0	0	1	0	0	4	11	43

**Отношение (%) численность персонала из группы
повышенного риска к численности всего мужского
персонала в зависимости от возраста и стажа**

Возраст, лет	Стаж на ИДК, лет								
	все	до 10	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-39	40 +
все	1,45	0,00	0,00	0,12	0,48	2,77	10,37	20,25	30,07
до 20	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-
20-24	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-
25-29	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-
30-34	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-
35-39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-
40-44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-
45-49	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	1,17	2,94	-	-
50-54	1,66	0,00	0,00	0,00	0,15	3,08	7,78	12,88	-
55-59	4,51	0,00	0,00	0,23	1,39	3,51	12,24	20,54	9,26
60-64	8,17	0,00	0,00	0,47	3,23	6,87	13,58	23,12	29,69
65-69	11,53	0,00	0,00	2,60	1,33	1,92	13,40	19,23	39,74
70 +	12,80	0,00	0,00	4,00	0,00	0,00	9,09	18,97	28,10

**Численность персонала из группы повышенного риска
в зависимости от возраста и стажа. Женщины**

Возраст, лет	Стаж на ИДК, лет								
	все	до 10	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-39	40 +
все	17	0	0	0	0	1	1	5	10
до 20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20-24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25-29	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30-34	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35-39	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40-44	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45-49	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50-54	1	0	0	0	0	0	0	1	0
55-59	3	0	0	0	0	0	1	2	0
60-64	5	0	0	0	0	1	0	1	3
65-69	7	0	0	0	0	0	0	1	6
70 +	1	0	0	0	0	0	0	0	1

***Отношение (%) численность персонала из группы
повышенного риска к численности всего женского
персонала в зависимости от возраста и стажа***

Возраст, лет	Стаж на ИДК, лет								
	все	до 10	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-39	40 +
все	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19	0,39	4,50	17,86
до 20	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-
20-24	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-
25-29	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-
30-34	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-
35-39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-
40-44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-
45-49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-
50-54	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,56	-
55-59	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,10	5,41	0,00
60-64	0,96	0,00	0,00	0,00	0,00	1,12	0,00	2,94	18,75
65-69	4,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,56	33,33
70 +	2,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,00

***Численность персонала из группы повышенного риска
в зависимости от возраста и стажа. Оба пола***

Возраст, лет	Стаж на ИДК, лет								
	все	до 10	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-39	40 +
все	769	0	0	5	16	82	231	247	188
до 20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20-24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25-29	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30-34	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35-39	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40-44	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45-49	13	0	0	0	0	11	2	0	0
50-54	120	0	0	0	1	32	69	18	0
55-59	235	0	0	1	6	19	96	108	5
60-64	230	0	0	1	8	19	47	84	71
65-69	111	0	0	2	1	1	13	26	68
70 +	60	0	0	1	0	0	4	11	44

**Отношение (%) численность персонала из группы
повышенного риска к численности всего персонала
в зависимости от возраста и стажа. Оба пола**

Возраст, лет	Стаж на ИДК, лет								
	все	до 10	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-39	40 +
все	1,25	0,00	0,00	0,10	0,41	2,39	9,33	18,91	29,01
до 20	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-
20-24	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-
25-29	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-
30-34	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-
35-39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-
40-44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-
45-49	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	1,10	2,56	-	-
50-54	1,33	0,00	0,00	0,00	0,12	2,67	7,30	12,00	-
55-59	3,68	0,00	0,00	0,16	1,02	2,70	11,07	19,53	8,93
60-64	7,02	0,00	0,00	0,37	2,50	5,41	11,63	21,37	28,98
65-69	10,33	0,00	0,00	2,13	1,10	1,33	10,08	17,57	39,08
70 +	11,76	0,00	0,00	3,70	0,00	0,00	7,69	17,74	25,43

**Основные характеристики персонала из группы
повышенного риска по группам предприятий
ГК «Росатом». Мужчины**

Наименование группы предприятий	Числен ность	Средний возраст, лет	Средняя доза за год, мЗв	Средняя накопленн ая доза, мЗв	Средний стаж на ИДК, лет
РОСАТОМ	752	60,2	3,55	453	35,8
РОСЭНЕРГОАТОМ	473	58,1	3,9	509,8	33,6
ТВЭЛ	37	64,9	1,57	321,4	34,76
АТОМРЕДМЕТЗОЛОТО	0	-	-	-	-
ЯДЕРНЫЙ ОРУЖЕЙНЫЙ КОМПЛЕКС	91	63,1	3,66	378	40,67
ЯДЕРНАЯ И РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ	62	62,9	0,75	364,6	40,76
БЛОК ПО УПРАВЛЕНИЮ ИННОВАЦИЯМИ	81	63,9	4,62	351,8	38,94
КАПИТАЛЬНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО	1	64	7,62	403,6	39
АТОМЭНЕРГОМАШ	7	69,7	1,1	250,8	46,29
ПРОЧИЕ	0	-	-	-	-

**Основные характеристики персонала из группы
повышенного риска по группам предприятий
ГК «Росатом». Женщины**

Наименование группы предприятий	Численность	Средний возраст, лет	Средняя доза за год, мЗв	Средняя накопленная доза, мЗв	Средний стаж на ИДК, лет
РОСАТОМ	17	63,5	2,66	278,3	40,76
РОСЭНЕРГОАТОМ	3	63,3	5,33	334,8	37,67
ТВЭЛ	0	-	-	-	-
АТОМРЕДМЕТЗОЛОТО	0	-	-	-	-
ЯДЕРНЫЙ ОРУЖЕЙНЫЙ КОМПЛЕКС	9	60,8	2,4	272,8	40,56
ЯДЕРНАЯ И РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ	1	69	0,54	167,6	46
БЛОК ПО УПРАВЛЕНИЮ ИННОВАЦИЯМИ	4	68,5	1,79	275,8	42,25
КАПИТАЛЬНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО	0	-	-	-	-
АТОМЭНЕРГОМАШ	0	-	-	-	-
ПРОЧИЕ	0	-	-	-	-

**Основные характеристики персонала из группы
повышенного риска по группам предприятий
ГК «Росатом». Оба пола**

Наименование группы предприятий	Численность	Средний возраст, лет	Средняя доза за год, мЗв	Средняя накопленная доза, мЗв	Средний стаж на ИДК, лет
РОСАТОМ	769	60,3	3,53	449,2	35,91
РОСЭНЕРГОАТОМ	476	58,2	3,91	508,7	33,63
ТВЭЛ	37	64,9	1,57	321,4	34,76
АТОМРЕДМЕТЗОЛОТО	0	-	-	-	-
ЯДЕРНЫЙ ОРУЖЕЙНЫЙ КОМПЛЕКС	100	62,9	3,55	368,5	40,66
ЯДЕРНАЯ И РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ	63	63	0,75	361,5	40,84
БЛОК ПО УПРАВЛЕНИЮ ИННОВАЦИЯМИ	85	64,1	4,49	348,2	39,09
КАПИТАЛЬНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО	1	64	7,62	403,6	39
АТОМЭНЕРГОМАШ	7	69,7	1,1	250,8	46,29
ПРОЧИЕ	0	-	-	-	-

Издательство «Перо» предлагает:

- ✓ Издание книг, монографий, брошюр, научных трудов
от 1 экз. от 3 дней
присвоение ISBN номера и выходных данных издательства
- ✓ Срочные публикации научных статей
- ✓ Также Вы можете опубликовать свои произведения в нашем литературном журнале «Современная литература России»
- ✓ Оказываем помощь в реализации
- ✓ Верстка, корректура и редакция текстов
- ✓ Полиграфические услуги

г. Москва, 109052, Нижегородская ул., д. 29-33, стр. 27, офис 105

www.pero-print.ru pero-print@yandex.ru

Тел. (495) 973-72-28; (495) 665-34-36

Научное издание



9 785000 861080

В.К. Иванов, А.М. Корело, А.П. Панфилов, С.В. Райков

**АРМИР:
СИСТЕМА ОПТИМИЗАЦИИ РАДИОЛОГИЧЕСКОЙ
ЗАЩИТЫ ПЕРСОНАЛА**

Издательство «Перо»

109052, Москва, Нижегородская ул., д. 29-33, стр. 27, офис 105

Тел.: (495) 973-72-28, 665-34-36

Подписано в печать 15.07.2014. Формат 60×90/16.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 18,875. Тираж 500 экз. Заказ 242.

Отпечатано в ООО «Издательство «Перо»