

**С.М. Киселев, М.В. Жуковский,  
И.П. Стамат, И.В. Ярмошенко**

**РАДОН.  
ОТ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
К ПРАКТИКЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ**



**МОСКВА • 2016**

**С.М. Киселев, М.В. Жуковский,  
И.П. Стамат, И.В. Ярмошенко**

**РАДОН.  
ОТ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
К ПРАКТИКЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ**

**МОСКВА • 2016**

УДК 614.876:546.296

ББК 51.26+31.42

P15

*Рецензенты:*

А.М. МАРЕННЫЙ – доктор физико-математических наук, академик РАЕН, заведующий лабораторией природных источников ионизирующих излучений Научно-технического центра радиационно-химической безопасности и гигиены ФМБА России,

И.П. КОРЕНКОВ – кандидат технических наук, доктор биологических наук, профессор, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна.

**Киселев С.М., Жуковский М.В., Стамат И.П., Яρμοшенко И.В.**

**P15** Радон: От фундаментальных исследований к практике регулирования. / Москва: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2016. – 432 с.

**ISBN 978-5-905926-11-2**

В книге рассмотрен широкий круг вопросов, касающихся свойств радиоактивного газа радона, методов его определения, биологического действия на организм человека. Проанализированы результаты широкомасштабных эпидемиологических исследований и обсуждены современные подходы к радиометрии радона и его ДПР. Особое внимание уделено вопросам регулирования радиационной защиты населения от радона. Проанализирован отечественный и зарубежный опыт регулирования «радоновой проблемы» в странах Европы, США и Канады. Авторами сформулированы предложения по дальнейшему совершенствованию радиационной защиты населения от источников природного облучения в отечественной практике регулирования. Издание предназначено для специалистов, работающих в области радиационной безопасности и охраны окружающей среды, исследователей в области радиобиологии и дозиметрии, специалистов строительной индустрии и читателей, интересующихся этими вопросами.

**ISBN 978-5-905926-11-2**

УДК 614.876:546.296

ББК 51.26+31.42

Монография подготовлена в рамках Федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года».

- P15 Kiselev S.M., Zhukovsky M.V., Stamat I.P., Yarmoshenko I.V.**  
Radon: From fundamental research to regulation practice. / Moscow: Publishing house «FGBU SRC Burnasyan FMBC, FMBA of Russia», 2016. – 432 p.

**ISBN 978-5-905926-11-2**

The book covers a wide range of questions dealing with properties of the radioactive gas radon, detection methods and biological effects on humans. The results of large-scale epidemiological studies are analysed, as well as state-of-the art approaches to the radiometry of radon and its progeny. A special focus is on the issues of public radiation protection regulation. Russian and world experience of the «radon problem» regulation in the European countries, USA and Canada is analysed. Suggestions on the further improvement of population radiation protection from the sources of natural radiation in Russian regulation practice are provided by the authors. The book is intended for experts in radiation safety and environmental protection, researchers in the field of radiobiology and dosimetry, construction engineers and readers interested in these issues.

© Киселев С.М. Жуковский М.В. Стамат И.П. Ярмошенко И.В.

© ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2016.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КИСЕЛЕВ СЕРГЕЙ МИХАЙЛОВИЧ, канд. биол. наук, заведующий лабораторией регулирующего надзора за объектами ядерного наследия отдела радиационной безопасности населения ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России. Область научной деятельности: радиационная защита населения и окружающей среды. Участник рабочей группы МКРЗ (2010-2014 гг.) по разработке современных рекомендаций Международной комиссии по радиологической защите населения от радона. Один из авторов публикации МКРЗ 126 (2014 г.) «Радиологическая защита населения от радона». Один из организаторов семинара МАГАТЭ по вопросам регулирования радиационной защиты от радона в России (2014 г.) Автор более 100 научных работ, в том числе 3-х монографий.

ЖУКОВСКИЙ МИХАИЛ ВЛАДИМИРОВИЧ, д-р. техн. наук, директор Института промышленной экологии УрО РАН, профессор кафедры экспериментальной физики Уральского федерального университета. Один из ведущих специалистов в области радиологической защиты, метрологии ионизирующего излучения, комплексного анализа природных и техногенных рисков, оценки радиационных рисков для населения от воздействия природных и техногенных источников ионизирующего излучения. Являлся членом группы экспертов Международного радонового проекта Всемирной организации здравоохранения. Автор более 270 научных работ, в том числе 5 монографий. В качестве научного руководителя подготовил 10 кандидатов наук.

СТАМАТ ИВАН ПАВЛОВИЧ, канд. техн. наук, д-р. биол. наук, заведующий лабораторией дозиметрии природных источников

ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева». Основная область научных интересов – радиационный контроль и радиационная безопасность населения при воздействии природных источников ионизирующего излучения. Автор более 100 научных работ, его трудами разработана современная система нормативно-правового и инструктивно-методического обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации при облучении природными источниками излучения, обоснован ряд гигиенических нормативов, которые вошли в НРБ-99/2009, ОСПОРБ-99/2010 и СанПиН 2.6.1.2800-10. Под его руководством разработана подсистема ЕСКИД, в рамках которой сформирован и уже более 15 лет функционирует Федеральный банк данных по дозам облучения населения Российской Федерации за счет природных источников излучения.

ЯРМОШЕНКО ИЛЬЯ ВЛАДИМИРОВИЧ, канд. физ.-мат. наук, заместитель директора по научным вопросам, старший научный сотрудник Радиационной лаборатории Института промышленной экологии УрО РАН. Тематика научных исследований связана с проблемой облучения населения радоном. Автор более 100 научных работ, в том числе 2 монографий.

**ОТДЕЛЬНЫЕ ГЛАВЫ / ПОДГЛАВЫ КНИГИ  
НАПИСАНЫ СЛЕДУЮЩИМИ УЧАСТНИКАМИ  
АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА:**

- |                              |  |
|------------------------------|--|
| <b><i>С.М. Киселев</i></b>   | Глава 1 (подглава 1.3),<br>Глава 7 (подглава 7.1),<br>Глава 8, Заключение                                  |
| <b><i>И.П. Стамат</i></b>    | Глава 5,<br>Глава 6 подготовлена совместно<br>с И.В. Ярмошенко,<br>Глава 7(подглава 7.2)                   |
| <b><i>М.В. Жуковский</i></b> | Глава 1 (подглавы 1.1-1.2),<br>Главы 2,3,4 подготовлены совместно с<br>И.В. Ярмошенко                      |
| <b><i>И.В. Ярмошенко</i></b> | Главы 2,3,4 подготовлены совместно с<br>М.В.Жуковским<br>Глава 6 подготовлена совместно<br>со И.П.Стаматом |

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	11
Introduction . . . . .	15
Предисловие . . . . .	18
Список русскоязычных сокращений . . . . .	23
Список англоязычных сокращений . . . . .	26
Термины и определения . . . . .	39
<b>Глава 1. Исторический обзор проблемы радона</b> <b>(Жуковский М.В., Киселев С.М.) . . . . .</b>	<b>33</b>
1.1. История радона до его открытия . . . . .	33
1.2. Открытие: три изотопа – трое великих ученых . . . . .	40
1.3. Современный этап радоновой проблемы . . . . .	45
<b>Глава 2. Радон как радиационно опасный фактор</b> <b>окружающей среды (И.В. Ярмошенко, М.В.Жуковский) . . . . .</b>	<b>51</b>
2.1. Вклад радона в облучение населения . . . . .	51
2.2. Общие характеристики изотопов радона и их ДГР . . . . .	53
2.3. Основные закономерности поступления и накопления радона в помещениях . . . . .	59
2.4. Основные геогенные и антропогенные факторы радоноопасности . . . . .	69

<b>Глава 3.</b> Результаты исследования эффектов облучения радоном (М.В. Жуковский, И.В. Ярмошенко) . . . . .	83
3.1. Эпидемиологические исследования последствий облучения радоном . . . . .	83
3.2. Модели радиационного риска, основанные на эпидемиологических данных . . . . .	99
<b>Глава 4.</b> Современные подходы к оценке доз облучения населения радоном и дочерними продуктами его распада (М.В.Жуковский, И.В. Ярмошенко) . . . . .	121
<i>Приложение к главе 4</i> . . . . .	144
Дозиметрическая модель респираторного тракта человека	
<b>Глава 5.</b> Средства и методы измерения объемной активности радона и аэрозолей короткоживущих дочерних продуктов распада радона и торона в воздухе (И.П. Стамат) . . . . .	172
5.1. Классификация средств и методов контроля ОА радона в воздухе . . . . .	172
5.2. Экспрессные средства и методы измерений ОА радона в воздухе . . . . .	177
5.3. Квазиинтегральные средства и методы измерений ОА радона . . . . .	180
5.4. Интегральные средства и методы измерений ОА радона в воздухе . . . . .	185
5.5. Радон-мониторы для измерений ОА и ЭРОА радона в воздухе . . . . .	189
5.6. Средства и методы измерения ОА аэрозолей ДПР радона и торона в воздухе . . . . .	191
5.7. Метрологическое обеспечение измерений ОА радона и ЭРОА изотопов радона в воздухе . . . . .	194

<i>Приложение к главе 5</i> . . . . .	198
Основные типы средств измерений ОА и ЭРОА радона и торона в воздухе в Государственном реестре РФ (2016 год)	
<b>Глава 6.</b> Методы обследования уровней облучения населения радоном в жилых и общественных зданиях ( <i>И.П. Стамат, И.В. Ярмошенко</i> ) . . . . .	202
6.1. Радиационное обследование зданий для целей определения среднегодовых значений ОА радона в воздухе помещений . . . . .	202
6.1.1. Радиационное обследование но- вых зданий для целей оценки их соответствия нормативам по среднегодовому значению ОА радона в воздухе . . . . .	204
6.1.2. Радиационное обследование экс- плуатируемых зданий для опреде- ления среднегодовых значений ОА радона в воздухе помещений . . . . .	211
6.2. Радоновое обследование территории . . . . .	214
<b>Глава 7.</b> Регулирование защиты населения от радона и дочерних продуктов распада ( <i>С.М. Киселев, И.П. Стамат</i> ) . . . . .	224
7.1. Международный опыт регулирования . . . . .	225
7.1.2. Опыт регулирования радоновой проблемы в странах Европы, США и Канады . . . . .	258
7.2. Отечественная практика регулирования . . . . .	324
7.2.1. Подходы к регулированию облучения населения радоном . . . . .	324

7.2.2. Современное состояние нормативно-правового обеспечения ограничения облучения населения радоном в Российской Федерации . . . . .	334
7.2.3. Структура доз и уровни облучения населения РФ за счет радона в воздухе помещений и других природных источников излучения . . . . .	348
<b>Глава 8.</b> Основные направления решения проблем ограничения облучения населения Российской Федерации радоном и дочерними продуктами его распада. Стратегические цели. Методы достижения (С.М. Киселев) . . . . .	393
8.1. Обоснование необходимости совершенствования деятельности по реализации принятой в России радоновой стратегии . . . . .	393
8.2. Предложения для федеральных органов исполнительной власти по реализации радоновой стратегии в соответствии с международными рекомендациями . . . . .	398
8.2.1. Предложения по организационным мероприятиям . . . . .	398
8.2.2. Предложения по отдельным компонентам рекомендованного ВОЗ, МКРЗ и МАГАТЭ национального плана действий . . . . .	403
Заключение . . . . .	425

## ВВЕДЕНИЕ

**Н**астоящая книга является результатом исследований современного состояния «радоновой проблемы», суть которой, по мнению авторов, состоит в создании эффективной и действенной системы обеспечения радиационной безопасности населения при воздействии такого естественного источника ионизирующего излучения, как радон. Следует отметить, что исторически изучение влияния радона на здоровье человека занимает значительный период времени. Однако интенсивные исследования облучения населения радоном в помещениях начали проводиться около полувека назад. Были проведены первые широкомасштабные измерения содержания радона в помещениях с длительным пребыванием людей и обширные эпидемиологические исследования в разных странах, целью которых являлась оценка риска возникновения заболеваний при длительном воздействии радона на население в помещениях. В итоге этих работ было получено прямое доказательство, подтверждающее обнаруживаемый риск рака легкого для населения от радона в жилищах. Было установлено, что радон является второй ведущей причиной смерти от рака легкого для курящих и первой для некурящих людей. Эти результаты привели к пониманию того, что снижение негативного влияния на здоровье человека облучения радоном представляет собой проблему как радиационной защиты, так и общественного здравоохранения.

Полученная в ходе этих работ информация свидетельствовала о том, что радон и дочерние продукты его распада составляют основной вклад в суммарную дозу облучения населения, которая значительно превосходит дозы, обусловленные другими природными и техногенными источниками ионизирующего излучения. Результаты этих работ послужили базой для формирования единого подхода к защите населения от радона в жилищах и на рабочих местах, сформулированного МКРЗ в Публикации 65. В основу рекомендаций данной публикации была положена концепция защиты наиболее облучаемых групп на-

селения путем установления уровней действия (600 Бк/м<sup>3</sup> в жилищах и 1500 Бк/м<sup>3</sup> на рабочих местах), превышение которых диктовало необходимость применения мер по снижению содержания радона в помещениях. Появление данной Публикации можно рассматривать в качестве важного этапа в формировании методологии управления (обеспечения) радиационной защиты профессионалов и населения при воздействии радона.

В развитии работ по радоновой проблеме в нашей стране можно выделить несколько периодов. В 70 – 80-е годы прошлого века работы проводились усилиями энтузиастов в нескольких направлениях. В результате были созданы первые образцы приборов для радоновых измерений, сформулированы подходы и временные требования к проведению обследований помещений на содержание радона в помещениях, изучалось облучение радоном шахтеров урановых рудников и работников различных других производств. Результаты работ по радоновой проблеме в этот период времени наиболее полно изложены в известной публикации Э.М. Крисюка, «Радиационный фон помещений, 1989»

Второй период связан с утвержденной в 1994 году Правительством Российской Федерации «Федеральной целевой программой снижения уровней облучения населения России и производственного персонала от природных радиоактивных источников на 1994–1996 гг.» (программа «Радон»). В рамках работ по программе были созданы документы, которые легли в основу нормативной базы регулирования, получили развитие работы по созданию средств и методов для всех видов измерения радоновых измерений – от инспекционных до интегральных, начали проводиться обследования населенных пунктов на содержание радона в помещениях, заложены основы системы оценки радоноопасности участков, отводимых под новое строительство. Однако недостаточное финансирование стало основной причиной прекращения действия программы, что не позволило выполнить большинство из намеченных мероприятий. До 2000 года отдельные разрозненные исследования и обследования по радоновой тематике выполнялись в рамках нескольких программ природоохранной направленности.

Третий этап – работы в рамках федеральных целевых программ (ФЦП) «Ядерная и радиационная безопасность России на 2000–2006 гг.» и «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 г.». Основная цель этих ФЦП состояла в ликвидации ядерного наследия, но часть мероприятий по программам предусматривала работы, направленные на снижение уровня облучения населения и техногенного загрязнения окружающей среды природными радионуклидами. За прошедший период фактически сформирована нормативная база регулирования по всем видам природных источников облучения, развита аппаратурно-методическая база измерений уровней всех радоновых факторов и контроля доз облучения, проведены широкомасштабные выборочные обследования населенных пунктов большинства регионов России на содержание радона в помещениях, был создан Федеральный Банк данных по дозам облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона и т.д. Подробно часть результатов этого периода работ рассмотрена в данной книге.

Стимулом для подготовки данной монографии явилась необходимость в большей степени гармонизировать работы в области снижения радоновой опасности в нашей стране с рекомендациями международных организаций, основанных на использовании всего накопленного в ряде зарубежных стран опыта в данной области. В ней представлены современные оценки радона как радиационно-опасного фактора окружающей среды, дозиметрические подходы по оценке доз облучения этим радиоактивным газом, средства и методы измерения его объемной активности, так и результаты исследования эффектов облучения радоном. Особое место в книге уделено вопросам эволюции системы радиационной защиты от облучения радоном. В этом разделе книги изложены основные положения современных рекомендаций ВОЗ, МКРЗ и МАГАТЭ в области снижения облучения населения этим радиоактивным газом, проанализирована международная и отечественная практика регулирования в данной сфере. Представлены современные подходы, применяемые в различных странах, при формировании радоновой стратегии, суть которой, в конечном итоге, состоит в последовательном уменьшении смертности

от радон-индуцированного рака легкого за счет снижения концентрации радона в помещениях до разумно достижимого низкого уровня на основании использования принципа ALARA. Особое внимание уделено вопросам реализации радоновой стратегии, которая предполагает в соответствии с международными рекомендациями утверждение долгосрочного национального плана действий, включающего широкий комплекс мероприятий по снижению облучения радоном не только наиболее облучаемых групп, но и всего населения страны. Завершается данный раздел предложениями по формированию ответственного национального плана действий. Отмечается, что в Российской Федерации имеются все условия для разработки и выполнения национального плана действий. При этом подчеркивается, что успех реализации предлагаемых в нем масштабных мероприятий определяется во многом не только финансовой поддержкой, но и официально сформулированной на федеральном уровне позицией в этой сфере (например, по аналогии с позицией по вопросу табакокурения).

Авторы считают необходимым выразить глубокую благодарность академику РАН Л.А. Ильину, профессору И.П. Коренкову, академику РАЕН А.М. Маренному за ценные замечания и предложения, сделанные ими при подготовке данной публикации.

Авторы выражают особую благодарность заместителю руководителя ФМБА России М.Ф. Киселеву за глубокое понимание и видение проблем, стоящих перед современной радиобиологией и радиационной гигиеной, и поддержку научных исследований в этих областях знаний.

Авторы надеются, что представленные в книге материалы могут представлять интерес для специалистов в области обеспечения радиационной безопасности населения, для лиц, принимающих решения в сфере радиационной защиты и охраны здоровья граждан, а также для широкого круга общественности, интересующейся данной проблемой.

## INTRODUCTION

The book is the result of investigation of the current status of the «radon problem», which according to the authors, requires an effective and efficient system of population radiation protection against a natural source of ionizing radiation like radon. It should be noted that, historically, radon health effects studies have been conducted for a considerable period of time. However, intensive research of population exposure to radon inside buildings started about half a century ago. Different countries conducted the first large-scale studies of radon content in buildings where people stayed for a long time, as well as epidemiological studies aimed at estimating health risks due to prolonged radon exposure to indoor populations. Radon was found to be the second leading cause of lung cancer for smokers and the first for non-smokers. The results helped to understand that the reduction of negative health effects from radon exposure is a problem of both radiation protection and public health care.

The information obtained in the course of the investigations showed that radon and its progeny make the main contribution to population exposure, which considerably exceeds the doses from other natural and anthropogenic sources of ionising radiation. The results of the studies became a basis of a consistent approach to the protection of the population from radon in homes and workplaces, defined in Publication 65 of ICRP. The recommendation of Publication 65 was based on the concept of protection of the most exposed population groups by estimating the exposure levels ( $600 \text{ Bq/m}^3$  in occupied buildings and  $1500 \text{ Bq/m}^3$  at workplaces), which if exceeded, necessitated installation measures to reduce radon levels in the buildings. This Publication can be considered as a milestone in development of methodology of management (provision) of radiation protection for professionals and population from radon exposure effects.

The development of studies of the radon problem in Russia consists of several periods. In the 1970-80s the studies were carried out by enthusiasts in several directions (Krisuk E.M., Tarasov S.I., Shamov N.I., et al

A study of radioactivity in building materials, 1971; Krisuk E.M. Health Phys. 38, 199, 1980). They resulted in the first radon measuring devices, development of approaches and temporary requirements for monitoring buildings for indoor radon concentration, as well as examining uranium miners and other industrial workers with a view to radon exposure. A full description of the radon problem evaluation of the period is given in the well-known publication by E.M. Krisuk, Radiation background in buildings, 1989.

The second period is related to the “Federal target program of reduction of exposure from natural radioactive sources to population and operating personnel of Russia in 1994-1996” (the “Radon” program), which was approved in 1994 by the Government of the Russian Federation. In the course of the work, documents were developed, which formed the basis of regulation. Tasks were launched to develop means and methods of measurement for all types of radon measurements, from simple inspection to complex measurements. Occupied areas were examined for indoor radon levels. The basic principles of radon hazard assessment of the lands used for the construction of buildings were developed. However insufficient funding was the main reason of the program termination, which prevented fulfilment of the majority of planned tasks. Until 2000 single isolated studies and examinations on radon topic were carried out within the framework of several environmental programs.

The third period included work within the framework of the Federal target programs, FTP, Nuclear and Radiation safety of Russia in 2000-2006, and Nuclear and Radiation Protection in 2008-2015. The main objective of these FTPs was to eliminate the nuclear legacy, but some tasks implied works aimed at the reduction of population exposure and the anthropogenic contamination of the environment with natural radionuclides. During this period the normative regulation base had been developed for all types of natural sources of radiation, the equipment/instrumental–procedural base of measurements of levels for all radon factors and dose control was created. Large-scale sample surveys for indoor radon levels were conducted the majority of Russian regions. The Federal Data Bank was developed for population exposure due to natural and anthropogenically changed radiation

background. Some of the results of this period are described in detail in the book.

The manuscript was motivated by the necessity to better harmonize works on the reduction of radon hazard in Russia with recommendations of international organizations, based on the whole range of experience accumulated in foreign countries. The book contains contemporary estimates of radon as a radiation-hazardous environmental factor; approaches to estimate dose from the radioactive gas; methods of measuring its concentration, and results of studies on radon exposure health effects. A special place in the book concentrates on the questions of evolution of the system of radiation protection against radon. This section states the fundamental principles of the recent recommendations from WHO, ICRP, and IAEA in terms of the reduction of population radon exposure, reviews international and Russian practice of regulation in this field. The contemporary approaches, which are used in different countries to develop a radon strategy, are described. The key target is consistent decrease of mortality from radon-induced lung cancer due to the reduction of indoor radon concentration to a reasonable low level based on the ALARA principle. A special focus is given to the issues of radon strategy implementation, which in accordance with the international recommendations, implies a long-term national plan of action, including a wide range of procedures to reduce radon exposure not only for the most exposed groups, but for the whole population. The section ends with proposals on the development of the national plan of action. It is noted also, that successful implementation of the proposed large-scale procedures is defined not only by financial support, but by the formally accepted position in this field at the federal level (similar to the position on tobacco smoking).

The authors feel it necessary to express their deep gratitude to the RAS Academician L.A. Ilyin, professor I.P. Korenkov, RENS academician A.M. Marennyy for their valuable comments and suggestions.

The authors hope that the materials presented in the book will be of interest to experts in the field of population radiation safety, for officials making decisions in the sphere of public radiation protection and health-care, as well as for a wide range of public interested in this topic.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Облучение населения природными источниками излучения является одним из основных факторов радиационного воздействия окружающей среды на человека. За счет радона и продуктов его распада создается около половины общей дозы облучения населения от природных источников излучения. В ряде случаев облучение населения радоном в жилищах приводит к годовым значениям эффективной дозы, превышающей предел дозы для лиц, профессионально работающих с ионизирующим излучением. Анализ, проведенный НКДАР ООН по оценке риска здоровью при облучении радоном, показал, что от 10 до 14% случаев рака легкого обусловлено облучением населения дочерними продуктами распада радона в жилищах. После курения облучение радоном является следующей основной причиной возникновения этого тяжелого заболевания. Все это послужило основанием для консолидации усилий международных организаций с целью изучения «радоновой проблемы» и выработки современных подходов к ее регулированию. В 2008 году ВОЗ в рамках Международного радонового проекта проанализировала результаты эпидемиологических исследований, которые продемонстрировали статистически достоверный канцерогенный эффект воздействия радона при достаточно умеренных уровнях объемной активности (ОА) радиоактивного газа в жилищах. Новая информация, полученная на основе объединенного анализа данных исследований связи между риском развития рака легкого и облучением радоном в жилищах, выполненных в Европе и Северной Америке, свидетельствует в пользу отсутствия порога объемной активности (ОА), ниже которого радоновое облучение не представляет никакой опасности.

Данные обстоятельства послужили основой для совершенствования подходов, направленных на обеспечение радонобезопасности населения. В ноябре 2009 Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) опубликовала заявление по радону, в кото-

ром национальным регулирующим органам рекомендовано ужесточить в два раза нормативы по ОА радиоактивного газа в жилищах. В 2010 г. МКРЗ была выпущена Публикация 115 «Риск возникновения рака легкого при облучении радоном и продуктами его распада», в которой проведена переоценка показателей номинального риска заболеваемости раком легкого при облучении радоном. В 2014 г. в Публикации 126 МКРЗ «Радиологическая защита от радона» была изложена современная методологии регулирования радоновой проблемы, в основу которой положен принцип оптимизации в управлении радоновым риском.

Регулированию ситуации облучения населения радоном, в связи с ее глобальностью и значимостью, уделено особое внимание в новой редакции стандартов безопасности МАГАТЭ.

В соответствии с новыми рекомендациями МКРЗ и требованиями МАГАТЭ Европейская комиссия в 2014г. выпустила новые Базовые стандарты безопасности, а также рекомендовала государствам-членам ЕС в течение четырех лет ввести в действие соответствующие национальные законы, отвечающие основным требованиям в области защиты населения от радона.

В России в ближайшей перспективе планируется переработка национальных регулирующих документов (НРБ и ОСПОРБ) по радиационной безопасности, которая инициирована выходом новых стандартов безопасности МАГАТЭ в 2014 году. Следуя международной практике, в эти документы необходимо внести изменения в части современных подходов в регулировании облучения населения от радона и его дочерних продуктов распада. В этом плане аналитическое рассмотрение изложенных в монографии современных рекомендаций международных организаций по радоновой проблеме, а также накопленного отечественного и зарубежного опыта в ее решении является своевременным ответом на запрос специалистов в области радиационной защиты населения от облучения природными источниками излучения.

Материалы, представленные в книге «Радон. От фундаментальных исследований к практике регулирования», подготовлены коллективом известных в стране и за рубежом специалистов, которые про-

фессионально занимаются данной проблемой в разных ее аспектах на протяжении многих лет. Основными источниками информации для подготовки к изданию этой монографии послужили собственные наработки, материалы статей и регулирующих документов различных стран, в том числе и России, а также рекомендации международных конференций и совещаний. При этом важно отметить, что авторы принимали деятельное участие в работе не только международных форумов по данной проблеме, но и профильных комитетов МКРЗ, МАГАТЭ и ВОЗ.

Поэтому с полной уверенностью можно сказать, что страницы этой книги отражают современное виденье радоновой проблемы, основанное на глубоких знаниях авторами всех ее аспектов, а представленные в ней материалы являются базовой основой, которая может быть использована для совершенствования современной отечественной радоновой стратегии. Актуальность подготовки данной публикации связана еще и с тем, что монографии по радоновой тематике на русском языке изданы более пятнадцати лет тому назад. Очевидно, что новые данные об опасности для населения радона при накоплении его в помещениях и принятие современных международных рекомендаций в области защиты населения от его воздействия, требуют обновления представленной в них информации.

Логика изложения представленной в книге информации позволяет разделить ее на две части. В первой – отражены исторические аспекты открытия радона и его изотопов, свойства радиоактивного газа, особенности его распределения и накопления в воздухе помещений, обсуждены эффекты воздействия радона на здоровье человека, изложены методические аспекты измерений радона и проведения обследований зданий и территорий на предмет выявления радоноопасных регионов. Материалы, представленные во второй части книги, отражают современное виденье «радоновой проблемы» глазами регулятора, занимающегося вопросами обеспечения радиационной защиты населения от источников природного облучения. Развивая это направление, авторы излагают современные рекомендации международных организаций НКДАР ООН, МАГАТЭ, МКРЗ, ВОЗ, при этом уделяют основное внимание

практическим аспектам их применения в странах Европы, США и Канады.

Особый интерес представляют материалы, изложенные в разделе «Отечественная практика регулирования защиты от облучения радоном», ценность которого определяется еще и тем, что они подготовлены специалистами, профессионально занимающимися вопросами регулирования этой проблемы в России. Отмечается, что в стране сложилась вполне гармоничная система нормативно-правового и инструктивно-методического обеспечения радиационной безопасности населения при воздействии природных источников излучения, которая является базовой основой для ее совершенствования в соответствии с современными международными рекомендациями. Осуществляются важные практические мероприятия: выявление групп населения, подвергающегося повышенному облучению радоном, обследование участков под строительство по критерию радоноопасности. На этой основе формируются базы данных, которые в сочетании с геологическо-геофизической информацией позволят в дальнейшем провести картирование территорий по радоноопасности и создать, в конечном итоге, атлас естественной радиации Российской Федерации.

Вместе с тем, авторами справедливо отмечается, что прогресс в создании нормативно-методических документов в сфере регулирования радоновой проблемы до настоящего времени значительно опережает действия по практической реализации мероприятий в этой области.

В завершающей книгу главе «Основные направления решения проблем ограничения облучения населения Российской Федерации радоном и дочерними продуктами его распада...» авторы предлагают подходы к совершенствованию регулирования облучения населения России радоном и дочерними продуктами его распада. В этом разделе сформулированы стратегические цели и методы их достижения с учетом новых научных данных и современного положения дел в области отечественного регулирования. Важно отметить мнение авторов о том, что реализация современной радоновой стратегии, учитывая ее комплексность и масштабы территории страны, во многом зависит не только от финансовых затрат, но от официально сформулированной

на федеральном уровне позиции (по аналогии с позицией по вопросу табакокурения).

Монография написана в хорошем стиле, отличается последовательной и скрупулёзной манерой изложения рассматриваемой проблемы. Вместе с тем, стремление авторов придать каждой главе законченный характер иногда приводит к излишней детализации и повторению отдельных фрагментов текста.

Однако в целом, материалы данной книги представляют несомненный научный и практический интерес для широкого круга специалистов, занимающихся радоновой проблемой, а также для лиц, принимающих в Российской Федерации решения в области обеспечения радиационной защиты населения от воздействия радона и сохранения здоровья граждан.

*Академик РАН*

*Л.А.Ильин*

## СПИСОК РУССКОЯЗЫЧНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- АМАД – Аэродинамический диаметр распределения аэрозолей по активности
- АЭС – Атомная электростанция
- ВНИИФ-ТРИ – Всероссийский Научно-Исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений
- ВОЗ – Всемирная организация здравоохранения
- ГОСТ – Государственный стандарт
- ГЭТ – Государственный эталон
- ДИ – Доверительный интервал
- ДОР – Дополнительный относительный риск
- ДПР – Дочерние продукты распада
- ЕС – Европейский союз
- ЕСКИД – Единая государственная система контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан
- КГРП – Карта геогенного радонового потенциала
- КДП – Коэффициент дозового перехода (в англоязычной литературе – DCF)
- МАГАТЭ – Международное агентство по атомной энергии
- МКРЕ – Международная комиссия по радиационным единицам и измерениям
- МКРЗ – Международная комиссия по радиологической защите

- ММАД – Массовый медианный аэродинамический диаметр
- МОТ – Международная организация труда
- МРЦ – Межрегиональный радиологический центр
- МУ – Методические указания
- НКДАР – Научный комитет по действию атомной радиации
- НПД – Национальный план действий
- НРБ – Нормы радиационной безопасности
- ОА – Объемная активность
- ОАЭ – Организация по атомной энергии
- ОБЭ – Относительная биологическая эффективность
- ООН – Организация объединенных наций
- ОСБ – Основные стандарты безопасности МАГАТЭ
- ОСПОРБ – Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности
- ОЭСР – Организация экономического сотрудничества и развития
- ПНИ – Природные источники излучения
- ППР – Плотность потока радона
- РАН – Российская академия наук
- РБДОПИ – Региональный банк данных по дозам облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона
- РГПО – Радиационно-гигиенический паспорт организации
- РГПТ – Радиационно-гигиенический паспорт территории
- РУ – Рабочий уровень

- РУМ – Рабочий уровень за месяц (в англоязычной литературе – WLM)
- РФ – Российская Федерация
- СМАД – Счетный медианный диаметр
- СМИ – Средства массовой информации
- УЭЭ – Удельная эффективная энергия
- ФАО – Продовольственная и сельскохозяйственная организация
- ФБДОПИ – Федеральный Банк данных по дозам облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона
- ФБУН – Федеральное бюджетное учреждение науки
- ФЗ – Федеральный закон
- ФМБА – Федеральное медико-биологическое агентство
- ФУОЗ – Федеральное управление общественного здравоохранения
- ФЦП – Федеральная целевая программа
- ЭРОА – Эквивалентная равновесная объемная активность
- ЮНЭП – Программа ООН по охране окружающей среды

## СПИСОК АНГЛОЯЗЫЧНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- ALARA – принцип удержания величины потенциальных облучений “на разумно достижимом низком уровне с учетом экономических и социальных факторов”
- AARST – Американская ассоциация ученых и технологов в области радона
- AFNOR – Французская ассоциация по нормированию
- ALA – Американская ассоциация пульмонологов
- ARS – Региональное агентство здравоохранения Франции
- ASHI – Американское общество инспекторов домов
- ASN – Государственный Орган по ядерной безопасности Франции
- BGS – Британская геологическая служба
- CDC – Центры по контролю и предотвращению болезней в США
- CEMRAД – Университет Лиможа, Центр по изучению и радиационной метрологии и дозиметрии, Лимож, Франция
- CRCPD – Дирекция конференции по контролю радоновых программ
- CSP – Кодекс о здравоохранении Франции
- CSTB – Научно–технический центр жилищно–гражданского строительства Франции
- DES – Департамент образования и навыков Ирландии

- DDREF – коэффициент эффективности дозы и мощности дозы
- DCF – коэффициент дозового перехода
- DCFm – коэффициент дозового перехода для мужчин
- DCFf – коэффициент дозового перехода для женщин
- DGS – Генеральная дирекция по здравоохранению
- DHUP – Дирекция по жилищному строительству, градостроительству и ландшафту Франции
- ELI – Институт экологического права
- EPA – Агентство по охране окружающей среды США
- ERR – дополнительный относительный риск
- FANC – Федеральное агентство ядерного контроля, Бельгия
- FRC – Функциональный остаточный объем легких
- HPST – Закон о здравоохранении Франции
- HSA – Департамент по безопасности и гигиене труда
- IRSN – Институт радиологической защиты и ядерной безопасности
- ISO – Международный стандарт качества
- IUPAC – Международный союз теоретической и прикладной химии
- LIMAIR – Институт по оценке качества воздуха во Франции
- LNET – Лифатические узлы экстраторакальной области легкого
- LNTN – Лифатические узлы торакальной области легкого
- NCHN – Национальный центр «Здоровый дом»

- NORM – Сырье и материалы, содержащие природные радионуклиды
- NRPA – Норвежское агентство по радиационной защите
- PHE – Управление общественного здравоохранения Англии
- PNR – Региональный природный парк провинции Лимузен, Франция
- RR – Относительный риск
- SEAI – Управление устойчивого энергоснабжения Ирландии
- WLM – Рабочий уровень за месяц (в русскоязычной литературе – РУМ)

## ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

**ALARA** – принцип удержания величины потенциальных облучений “на разумно достижимом низком уровне с учетом экономических и социальных факторов”

### **Коэффициент равновесия (F)**

Отношение эквивалентной равновесной объемной активности радона к объемной активности радона газа. Другими словами, это отношение удельной потенциальной энергии альфа-излучения для фактической смеси продуктов распада радона к концентрации, которая применялась бы при радиоактивном равновесии.

### **Коэффициент эффективности дозы и мощности дозы (DDREF)**

Отношение между риском или радиационным ущербом на единицу эффективной дозы в случае высоких доз и/или мощностей дозы и в случае низких доз и мощностей дозы. Используется при оценке коэффициентов риска в случае низких доз и мощностей дозы на основании наблюдений и выводов эпидемиологических исследований в случае высоких доз и мощностей дозы.

### **Модель риска**

Модель, описывающая изменение коэффициента риска в зависимости от модифицирующих факторов, таких как время после облучения, достигнутый возраст или возраст при облучении и др.

### **Рабочий уровень (РУ, WL)**

Историческая единица измерения удельной потенциальной энергии альфа-излучения, определяемая как любая комбинация активности короткоживущих дочерних продуктов распада радона в одном кубометре воздуха, которая приводит к эмиссии  $1,30 \cdot 10^8$  МэВ·м<sup>-3</sup> потенциальной энергии альфа-излучения, приблизительно равная  $2,08 \cdot 10^{-5}$  Дж·м<sup>-3</sup>.

## **Рабочий уровень за месяц (РУМ, WLM)**

Кумулятивная экспозиция от вдыхания воздуха при концентрации 1 рабочий уровень за один рабочий месяц длительностью 170 часов.

## **Радоноопасная территория**

Географическая область или административный район, для которого достоверно установлены значительно более высокие уровни объемной активности радона в воздухе зданий, чем в других частях страны или района.

## **Референтный уровень**

В ситуациях существующего облучения это уровень дозы или риска, превышение которого при планировании облучения считается неприемлемым и ниже которого должна осуществляться оптимизация защиты. Выбранная величина референтного уровня зависит от обстоятельств рассматриваемой ситуации облучения.

## **Риск**

Величина, определяющая вероятность возникновения определенных неблагоприятных последствий облучения (например, рака легкого).

Термины, относящиеся к риску:

- *Относительный риск*

Отношение показателя заболеваемости или показателя смертности от рассматриваемого заболевания (рак легкого) в облученной популяции к таковому в необлученной популяции.

- *Дополнительный относительный риск (ДОР)*

Относительный риск – 1.

- *Коэффициент риска*

Приращение риска на единицу экспозиции или на единицу дозы. Как правило, выражается как дополнительный относительный риск на рабочий уровень за месяц, на Дж·ч·м<sup>-3</sup>, на 100 Бк·м<sup>-3</sup> или на Зв.

- *Пожизненный риск*

Риск, накопленный индивидом к определенному возрасту.

- *Ущерб*

Ущерб является концепцией МКРЗ. Он отражает суммарный вред здоровью, причиненный членам облученной группы и их потомкам в результате облучения. Ущерб – это многомерное понятие. Его главными составляющими являются стохастические величины: вероятность атрибутивного смертельного рака, взвешенная вероятность атрибутивного несмертельного рака, взвешенная вероятность тяжелых наследственных эффектов и количество потерянных лет жизни в случае причинения вреда.

- *Риск, скорректированный на ущерб*

Вероятность проявления стохастического эффекта, модифицированная с учетом компонент ущерба так, чтобы выразить тяжесть последствий.

### **Ситуация существующего облучения**

Ситуация, связанная с источником, уже существующим на момент принятия решения по контролю за облучением, включая природное фоновое ионизирующее излучение, облучение на загрязненных территориях в отдаленный период после ядерной или радиационной аварии и остаточное облучение от деятельности в прошлом, осуществлявшейся вне рамок рекомендаций МКРЗ.

### **Условный дозовый переход (Dose conversion convention)**

Этот метод, определенный в Публикации 65 МКРЗ (ICRP, 1993), применяется для установления связи экспозиции дочерних продуктов распада радона (выраженной в РУМ или  $\text{мДж}\cdot\text{ч}\cdot\text{м}^{-3}$ ) с эффективной дозой (выраженной в мЗв) на основе равенства ущербов.

### **Удельная потенциальная энергия альфа-излучения<sup>1</sup>**

Объемная активность короткоживущих дочерних продуктов радона-222 или радона-220 в воздухе, выраженная в единицах энер-

<sup>1</sup> В русскоязычной специальной литературе часто используется термин «скрытая энергия».

гии альфа-излучения, испускаемого любой смесью короткоживущих дочерних продуктов радона-222 или радона-220 в единице объема воздуха при полном распаде дочерних продуктов радона-222 до свинца-210 или дочерних продуктов радона-220 до свинца-208. Единица измерения удельной потенциальной энергии альфа-излучения в СИ – Дж·м<sup>-3</sup>.

### **Эквивалентная равновесная объемная активность**

Объемная активность газообразного радона в равновесии со своими короткоживущими дочерними продуктами, которые имели бы такую же удельную потенциальную энергию альфа-излучения, как и существующая неравновесная смесь.

# Глава 1

## ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПРОБЛЕМЫ РАДОНА

(М.В. Жуковский, С.М. Киселев)

*В настоящей главе представлен экскурс в историю формирования представлений о радиоактивной газе радоне и дочерних продуктах его распада как значимых факторах внешней среды, оказывающих воздействие на здоровье человека. Обсуждены результаты научного поиска ученых, открывших радон, описавших его свойства и биологические эффекты воздействия на организм человека. Рассмотрены современные аспекты радиационной защиты населения от данного компонента природного облучения и роль международных организаций в этом процессе.*

### 1.1. История радона до его открытия

В отличие от многих элементов, сначала открытых человеком, а потом так или иначе исследованных или используемых, история радона, как это ни парадоксально, началась задолго до его открытия...

Примерно в 1470 г. в районе Шнееберга, маленького городка в Саксонии (Германия), на северном склоне горы Эрцгебирге (Рудная гора) была развернута интенсивная добыча серебра. В то время серебро добывали и в районе Иоахимстали (ныне Яхимов), на южной Богемской стороне Рудной горы. Способы добычи, применяемые в этих районах в начале XVI века, описаны и проиллюстрированы Георгом Агриколой (1494–1555), называемым отцом минералогии и работавшим врачом в Иоахимстали с 1527 по 1531 г. (рис. 1.1). В своей наиболее известной книге «De Re Metallica» (Agricola, 1556) [1] (рис. 1.2) он пишет, что в Яхимове серебряная руда добывалась поверхностным способом, в то время как в Шнееберге – с больших глубин. Некоторые шахты достигали 400 м глубины.



*Рис. 1.1. Георг Агрикола*



*Рис. 1.2. Титульный лист книги Георга Агриколы «DeReMetallica»*

Условия работы в таких шахтах и применяемые в них системы вентиляции были подробно проиллюстрированы в книге. Пассивная вентиляция обеспечивалась созданием зоны пониженного давления в верхней части вентиляционного короба за счет взаимодействия воздушных потоков с крестообразными ветровыми экранами (рис. 1.3). Крестообразная конструкция ветрового экрана должна была обеспечивать работоспособность системы при любом направлении ветра. Системы приточной вентиляции действовали по принципу флюгера, ориентирующего заборное отверстие вентиляционного канала по направлению ветра (рис. 1.4). Правда, в штиль эффективность работы подобной системы существенно падала. В этом случае вентиляция атмосферы в шахтах могла осуществляться воздушными мехами (рис. 1.5) либо вентиляторами с лопастями (рис. 1.6). Естественно, ожидать высокой эффективности от таких устройств не приходилось.



*Рис. 1.3. Пассивные системы вытяжной вентиляции в шахтах*



*Рис. 1.4. Пассивные системы приточной вентиляции в шахтах*

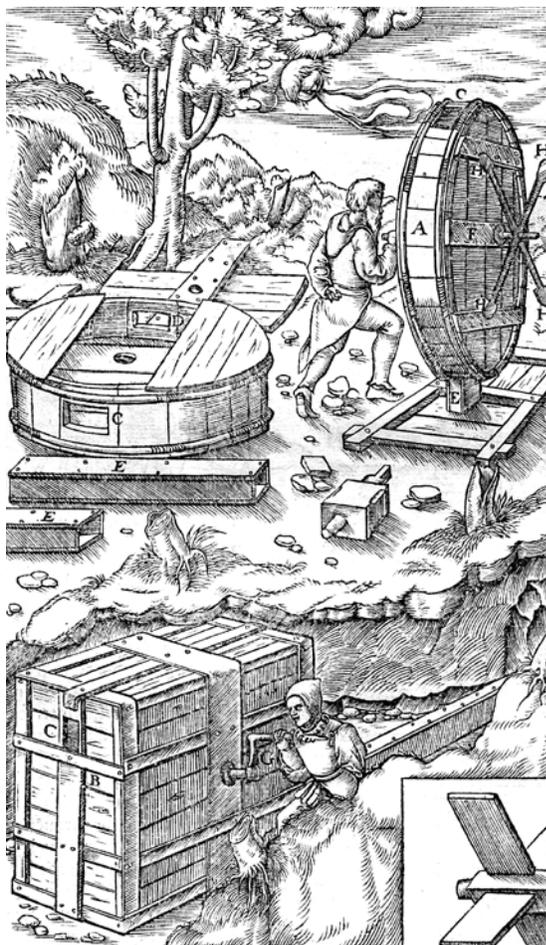


*Рис. 1.5. Активные системы вентиляции в шахтах*

Труд в условиях, продемонстрированных на гравюрах Агриколы, трудно назвать способствующим укреплению здоровья работающих на любых рудниках. Что же касается района Шнееберга, то он существенно выделялся даже на фоне остальных горнорудных регионов Европы. Уже в начале XVI века среди здешних шахтеров была замечена необычно высокая смертность от легочных заболеваний, особенно у молодых рабочих. Первое упоминание об этом сделал Парацельс (1493–1541) (рис. 1.7) в своей книге «Von der Bergsucht und anderen Bergkrankheiten» (О «Bergsucht» и других горных болезнях). Выражение «Bergsucht» является обобщающим термином для легочных заболеваний, наблюдаемых у шахтеров. Парацельс написал эту книгу в 1537 г., но она была опубликована только после его смерти (Paracelsus, 1567) [2] (рис. 1.8). Парацельс предположил, что заболевания легких вызываются вдыханием рудной пыли, содержащей различные металлы.

В своей знаменитой книге «De Re Metallica» Агрикола также пишет о вредном воздействии атмосферы шахт: «...Пыль имеет разрушающие свойства, она разъедает легкие и поселяет в тело чахотку. Имеются женщины, которые были замужем за семьей мужьями, всех которых эта ужасная чахотка привела к преждевременной смерти». Он разрабатывал различные системы вентиляции, представленные в его книге, и рекомендовал использовать простейшие защитные маски из ткани, закрывающие нос и рот.

Частота этого легочного заболевания, которое позже назвали Schneeberger Lungenkrankheit (Шнеебергская легочная болезнь), возросла в XVII и XVIII вв., когда была увеличена добыча серебра, меди и кобальта. Заболевание фиксировалось многократно чаще, чем в ближайшем городе, где не занимались добычей руды. Окончательно заболевание идентифицировали как рак легкого Хертинг и Гессе (Haerting and Hesse, 1879) [3]. Условия работы в шахтах Шнееберга во второй половине XIX в. – в тексте их статьи:



**Рис. 1.6.** Активные системы вентиляции в шахтах



AV. PH. TH. P. A. R. A. C. E. L. S. V. S. A. E. T. A. T. S. V. A. E. 47.

Рис. 1.7. Парацельс (1493 – 1541)



Рис. 1.8. Титульный лист книги Парацельса

«В зависимости от того, является смена дневной или ночной, шахтеры собираются около 6 часов утра или вечера около здания шахты. После переключки и общей молитвы они направляются в здание шахты и спускаются в нее. Их реальная работа начинается около 7 часов утра или вечера. Как правило, около 11 часов начинаются взрывные работы (ныне проводимые с помощью динамита). Между 11 и часом рабочие обычно собираются в основном штреке, где они вместе обедают. Довольно часто некоторые рабочие, особенно молодые, ложатся на деревянный настил, чтобы немного поспать, хотя спать в шахте запрещено. В час работа возобновляется и длится до 5 часов, когда снова начинаются взрывные работы. После этого смена заканчивается... Рабочие спускаются в шахту в той же одежде, в которой они пришли на работу, и в ней же они возвращаются домой... Завтрак шахтера, который он ест во время своего полуденного (полуночного) перерыва, состоит из жидкого кофе и куса хлеба без следов бекона и зачастую сопровождается такой роскошью, как кусок сосиски или яйцо... Шахтеры женятся рано и к тому моменту, когда они умирают в возрасте сорока с небольшим лет, оставляют достаточно большое количество детей...»

В своей работе Хертинг и Гессе изучали как эпидемиологию легочных заболеваний среди шахтеров, так и условия их работы в шахтах, содержание пыли и углекислого газа в атмосфере рудника и т. д. Полученные ими данные остаются корректными и научно значимыми даже спустя 140 лет после опубликования:

*«(1) Эндемичное заболевание горнорабочих, наблюдающееся в шахтах Шнееберга, является преимущественно раком легкого и им обусловлено около 75 % случаев смерти.*

*(2) Заболевание является лимфосаркомой или, в редких случаях, эндотелиальной карциномой; две формы сосуществуют вместе и возникают в бронхиальных лимфатических узлах.*

*(3) Все шахтеры, не умершие от других причин или от интеркуррентных заболеваний, неизбежно умрут от рака легкого.*

*(4) Возникновение заболевания не происходит, по крайней мере, в течение 20 лет после начала работы в шахтах; заболевание обычно возникает позже... Забойщики поражаются заболеванием чаще, чем другие группы рабочих, постоянно работающих в тоннелях; каменщики и плотники, не постоянно работающие в шахтах и имеющие временные отпуска в летний период, наименьшим образом подвержены заболеванию...»*

В своих исследованиях авторы сопоставили заболеваемость шахтеров Шнееберга с данными по аналогичным шахтам в Швеции, Венгрии, Тироле и Иоachimстали (Богемия). Оказалось, состояние здоровья шахтеров на указанных рудниках гораздо лучше, чем в Шнееберге, и заболеваемость раком легкого не наблюдается. Лишь в 1926 г. было показано, что шахтеры Иоachimстали также подвержены повышенной заболеваемости раком легкого.

Потребовалось почти пять веков, чтобы исследователи вынесли заключение, что не только «рудная пыль, содержащая различные металлы», как о том писал Парацельс, но и невидимый газ радон, промежуточное звено в цепи распада радиоактивных урана и тория, мог оказывать влияние на возникновение «бергзухта» и других легочных заболеваний шахтеров.

Следует отметить, что 150 лет назад рак легкого был весьма редким заболеванием. Постепенное увеличение его частоты было от-

мечено после 1900 г., а в 30-е гг. XX века заболеваемость стала все больше возрастать. В настоящее время рак легкого является наиболее распространенным видом рака в мире.

## 1.2. Открытие: три изотопа – трое великих ученых



*Рис. 1.9. Эрнст Дорн  
(1848–1916)*



*Рис. 1.10. Эрнест  
Резерфорд (1871 – 1937)*

На вопрос «кто же в конце концов открыл радон?» не всегда можно получить определенный ответ. В докладе, подготовленном для 41-й Ассамблеи IUPAC (International Union Pure and Apply Chemistry) [4], сказано: «*радон был открыт в 1900 году немецким физиком Фридрихом Эрнстом Дорном*» (рис. 1.9). Неоднократные упоминания, что именно Дорн является первооткрывателем радона, можно встретить в самых разнообразных литературных источниках. Если заглянуть в Интернет, то примерно в 90 % ссылок утверждается, что открытие радона принадлежит Дорну. Тем не менее в ряде публикаций приоритет Дорна в открытии радона безо всяких комментариев игнорируется, и пальма первенства отдается Эрнесту Резерфорду (рис. 1.10). Радон, действительно, открывали неоднократно, и в, отличие от других подобных историй, каждое новое открытие не опровергало, а лишь дополняло предыдущие.

Дело в том, что никто из ученых не имел дела с элементом радоном – элементом в обычном для нас понимании этого слова. Одно из нынешних определений элемента – «совокупность атомов с общим

числом протонов в ядре», т. е. разница может быть лишь в числе нейтронов. По существу, элемент – это совокупность изотопов. В связи с этим следует понимать, что Резерфорд и Оуэнс, Рамзай и Содди, Дорн, Дебьерн независимо друг от друга в период с 1899 по 1904 г. находили изотопы одного и того же элемента – № 86. Все эти открытия были продолжением пионерских работ супругов Кюри в области радиоактивности. В каждом из них, как считали их авторы, был обнаружен свой, новый радиоактивный газ, новый элемент.



*Рис. 1.12. Андре Луи Дебьерн (1874–1949)*

Хронологически первыми были работы Э. Резерфорда и Р. Оуэнса, проведенные в Канаде [5–7]. Вот что рассказывал об этом в 1936 г. сам Резерфорд (это фрагмент последнего публичного выступления Резерфорда, его доклада «Сорок лет развития физики»):

*«... В 1898 г. я приехал в Мак-Гиллский университет в Монреале и там встретился с Р. Оуэнсом, новым профессором электротехники, который прибыл одновременно со мной. Оуэнс имел стипендию, которая обязывала его проводить некоторые физические исследования. Он спросил, не могу ли я ему предложить тему, которую он мог бы исследовать для оправдания этой стипендии. Я предложил ему исследовать с помощью электроскопа торий, радиоактивность которого была тем временем открыта... Я помогал ему в проведении экспериментов, и мы обнаружили некоторые очень странные явления. Оказалось, что радиоактивное воздействие окиси тория может проходить сквозь дюжину листов бумаги, положенных поверх этой окиси, но задерживается тончайшей пластинкой слюды, как будто излучается что-то, способное диффундировать сквозь поры бумаги. Тот факт, что прибор был очень чувствителен к движению воздуха, поддерживал эту диффузионную гипотезу. Затем мы провели эксперименты, в которых воздух проходил над окисью тория, а потом попадал в ионизационную камеру. Эти опыты показали, что*

*активность может переноситься воздухом. Однако когда поток воздуха прекращался, активность в ионизационной камере не сразу исчезала, а уменьшалась постепенно по экспоненциальному закону. Я назвал это газообразное вещество, которое может диффундировать сквозь бумагу, переноситься воздухом и в течение некоторого времени сохранять свою активность, исчезающую по характерному закону, “эманацией тория”.*

*... Необходимо было выяснить истинную природу эманации. Это было очень трудно, так как доступное количество ее всегда было очень малó. С самого начала Содди и я предположили, что это, должно быть, инертный газ вроде гелия, неона или аргона, так как нам не удавалось заставить его соединиться с каким-либо химическим веществом...»*

Интересный анализ приоритетности открытия радона был сделан в работе Джеймса и Виржинии Маршалл [8], в которой они постарались рассмотреть историю, опираясь на оригинальные статьи авторов–первооткрывателей элементов. Это помогло установить хронологию событий. Так, в частности, статья Дорна, в которой он описывает открытие «своего» радона [9], начинается со ссылки на выполненные несколькими месяцами ранее работы Резерфорда [6, 7]: *«Резерфорд писал, что другие радиоактивные вещества, такие как уран, не проявляют таких свойств, как торий. Я принял подход, предложенный Резерфордом, и сделал еще одно исследование других радиоактивных веществ, доступных в нашем Институте».*

Далее Дорн сообщает о тщательно проведенном исследовании, в котором путем повторения методики, предложенной Резерфордом, – использования электрометра для регистрации активности – он установил, что уран и полоний действительно не обладают эманацирующими свойствами тория. В то же время в эксперименте было обнаружено наличие эманации у соединений радия. Дорн не стал делать никаких предположений о природе найденной им эманации радия и ограничился заявлением, что, по-видимому, она обусловлена неким «физико-химическим процессом», хотя впоследствии это будет оценено как открытие радона.

Итак, исходя из приведенных данных, следует, что приоритет открытия радона как элемента принадлежит все же, даже и по признанию Дорна, Эрнесту Резерфорду. Его статья, впервые описывающая свойства «эманации» тория, датирована 13 сентября 1899 г. Официально точная дата открытия радона нигде не обозначена, но, по видимому, указанную дату как раз и можно считать таким днем.

Радон, открытый Дорном, это самый долгоживущий изотоп элемента № 86. Образуется он при альфа-распаде радия-226. Массовое число этого изотопа 222, период полураспада 3,82 суток. Существует в природе как одно из промежуточных звеньев в цепи распада урана-238. Эманация тория (торон), открытая Резерфордом и Оуэнсом, член другого естественного радиоактивного семейства – семейства тория. Это изотоп с массовым числом 220 и периодом полураспада 54,5 с.

В 1904 г. французский ученый Андре Луи Дебьерн установил эманации в соединениях актиния – элемента, который он открыл в 1899 г. Актинон, открытый Дебьерном, тоже член радиоактивного семейства урана-235. Это третий природный изотоп радона и из природных – самый короткоживущий. Его период полураспада меньше 4 с (точнее, 3,92 с), массовое число 219. Данными тремя изотопами ограничивается список изотопов радона, встречающихся в природе.

Конец XIX и начало XX в. были исключительно богаты на открытия, связанные с ионизирующим излучением: рентгеновские лучи, радиоактивность, полоний, радий, радон. Следует отметить, что практически все вновь открытые вещества и эффекты пытались применить в различных областях науки, в том числе и в медицине. Применение ионизирующего излучения и радиоактивных веществ в медицине велось методом проб и ошибок. В результате этого страдали как медики, так и их пациенты, тем не менее, в ряде случаев удалось достигнуть весьма существенных результатов. Выяснилось, что лучи, испускаемые радием, способны бороться с раковыми опухолями, рентгеновские лучи позволяют поставить более надежный диагноз в сложных случаях и т.д.

Не остался обойденным вниманием медиков и радон. Оказалось, что принятие ванн в воде, насыщенной радоном, оказывает благотворное влияние на пациентов с заболеваниями опорно-двигательного ап-

парата, сердечно-сосудистыми заболеваниями и рядом других патологий.

Благотворное влияние природных минеральных вод европейских курортов и курортов Кавказа было хорошо известно задолго до открытия радона. Открытие радона и обнаружение значительных его концентраций в природных водах позволило медикам подвести дополнительную научную базу под обоснование целительного действия водных бальнеологических процедур. Считается, что радонотерапия (облучение в околофоновых дозировках) является одним из эффективным способов стимуляции ослабленных защитно-приспособительных сил больного организма, когда действие других природных факторов стимуляции невозможно или недостаточно [10].

На тему благотворного влияния малых доз облучения сломано немало копий, и в эту полемику мы ввязываться не станем. Оспаривать благотворный эффект курортного лечения с использованием радона по меньшей мере бессмысленно. В связи с этим лишь отметим, что реальные радиационные риски для пациента при радонотерапии являются пренебрежимо малыми и общая польза от бальнеологического лечения многократно превышает потенциальный риск воздействия низких уровней облучения во время принятия процедур.

Вместе с тем в XX в. реально была установлена и патогенная роль радона. В 1940-х гг. в мире началась добыча и переработка урана для военных целей. Основными источниками в то время были урановые залежи в Бельгийском Конго, Канаде и в Колорадо (США). По директиве Правительства СССР в 1946 г. развернулась интенсивная добыча урана в историческом горнорудном районе Шнееберг, а затем с 1948 г. – в Богемии. В то же самое время добыча урана началась во Франции.

На начальной стадии добычи урана радиологической защите рабочих уделялось мало внимания. Предполагалось, что уровни радона в этих новых шахтах значительно ниже, чем в старых шахтах Рудных гор. На тот период имелись сведения только об отдельных измерениях радона. В шахтах Колорадо пробы радона не отбирались до 1950 г., а для урановых шахт Восточной Германии данные по радону стали доступны только после 1955 г.

В течение этого периода продолжались дозиметрические исследования и радиобиологические поиски возможных эффектов от ингаляции радона. Однако все попытки объяснить возникновение рака легкого ингаляцией только газообразного радона были безуспешными, пока Вильям Ф. Бэйл не выдвинул идею, что основной причиной могут быть продукты распада радона [11]. Он писал в своем меморандуме: *«В этих и других прошлых оценках вреда, связанного с радоном, полностью пренебрегали важнейшим фактом, а именно тем, что дозы облучения от продуктов распада радона, в большинстве случаев присутствующих в воздухе вместе с самим радоном, по видимому, значительно превышают дозы облучения самим радоном и продуктами его распада, образовавшимися в бронхах»*. Дальнейшие исследования, проведенные учеными разных стран, полностью подтвердили эту гипотезу. Из этих исследований был сделан вывод, что максимальные дозы  $\alpha$ -облучения следует ожидать в клетках-мишенях сегментальных бронхов. Дозиметрия легких от ингалированных короткоживущих дочерних продуктов распада (ДПР) радона остается важной и противоречивой областью исследований.

Результатом этих исследований стала разработка более надежных методов мониторинга дочерних продуктов распада радона в шахтах. В Соединенных Штатах появилась концепция скрытой энергии ДПР в воздухе, так называемая «концепция рабочего уровня». Накопление данных о рабочих уровнях радона в шахтах и об эффектах облучения шахтеров позволило в начале 1960-х гг. провести в США первое эпидемиологическое исследование, которое выявило высокую заболеваемость раком легкого среди подземных шахтеров [12]. Фактически эти работы послужили началом современного этапа развития радоновой проблемы.

### **1.3. Современный этап радоновой проблемы**

Начиная со второй половины прошлого века, были выполнены обширные научные исследования, позволившие установить вклад радона в облучение населения природными источниками излучения.

Были получены оценки риска возникновения рака легкого при облучении радоном шахтеров. С 70-х г. прошлого века начинают интенсивно развиваться исследования по измерению объемной активности радона в жилищах, которые в конечном итоге позволили прийти к пониманию значимости ущерба для здоровья населения вследствие облучения этим радиоактивным газом в жилищах. Проведенные в последующем эпидемиологические исследования показали, что риск возникновения рака легкого при облучении радоном населения в жилищах сравним с аналогичными оценками, полученными для шахтеров. Полученные данные стали основой создания современной базы регулирования радоновой проблемы, процесс формирования которой приобрел унифицированный характер. Он предусматривает участие ведущих международных организаций, имеющих четко обозначенный предмет деятельности, которая осуществляется в определенной последовательности. В число таких организаций входят, в первую очередь, Научный комитет по действию атомной радиации ООН (НКДАР ООН), Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ), Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ). Особое место в этой системе занимает Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ), поскольку защита населения от воздействия радона является проблемой не только радиационной защиты, но и общественного здравоохранения. Учитывая важную роль, которую эти организации сыграли в разработке концепций радиационной защиты от воздействия радона, целесообразно кратко охарактеризовать предмет их деятельности.

Научный комитет по действию атомной радиации ООН был учрежден Генеральной Ассамблеей Организации Объединенных Наций в 1955 г. В соответствии с мандатом ООН он должен осуществлять научную оценку уровней и эффектов воздействия ионизирующего облучения на здоровье человека и окружающую среду. НКДАР ООН последовательно осуществляет научную оценку информации об источниках радона и эффектах его воздействия на организм человека, результаты которой периодически публикуются в отчетах, представляемых Генеральной Ассамблее ООН. Эти отчеты представляют современную научную точку зрения по рассматриваемой проблеме,

которая вырабатывается на заседаниях Комитета ведущими учеными и экспертами на основании анализа результатов научных публикаций. Правительствам и организациям во всем мире предписано полагаться на оценки НКДАР ООН в качестве научной основы для оценки радиационного риска и разработки мер защиты.

Международная комиссия по радиологической защите является независимой организацией, которая, в том числе на основании научных оценок НКДАР ООН, разрабатывает, поддерживает и развивает рекомендации в области международной системы радиационной защиты. Указанные рекомендации используются во всем мире в качестве общей основы для создания стандартов радиационной защиты, а также разработки законодательных актов, руководящих принципов, программ и практических мероприятий, направленных на предотвращение онкологических, а также других заболеваний и негативных последствий, связанных с воздействием ионизирующего излучения на организм человека и окружающую среду. Несмотря на то, что МКРЗ не имеет формального права навязывать кому-либо свои предложения, практическое законодательство в большинстве стран в основном следует ее рекомендациям.

Международное агентство по атомной энергии является самостоятельной организацией, созданной в 1957 г. в рамках Организации Объединенных Наций, деятельность которой направлена на развитие сотрудничества в области мирного использования атомной энергии. Одним из приоритетных направлений деятельности МАГАТЭ является разработка международных стандартов безопасности. Они отражают международный консенсус в отношении того, что составляет высокий уровень безопасности для защиты людей и окружающей среды от вредного воздействия ионизирующего излучения. При осуществлении своей миссии МАГАТЭ руководствуется интересами и потребностями государств-членов, стратегическими планами и видением, воплощенными в Уставе МАГАТЭ. В основе миссии МАГАТЭ лежат три основных направления: защита и безопасность, науки и технологии, гарантии и проверки.

Всемирная организация здравоохранения является направляющей и координирующей инстанцией в области здравоохранения в

рамках системы Объединенных Наций. Она несет ответственность за обеспечение ведущей роли при решении проблем глобального здравоохранения, установление медицинских норм и стандартов, разработку политики в области охраны здоровья. ВОЗ определяет направления научных исследований в области здравоохранения и стимулирует сбор, освоение и распространение ценных знаний, обеспечивает техническую поддержку странам, а также контроль ситуации в области здравоохранения и оценку динамики ее изменения.

Конечно, деятельность ВОЗ, НКДАР ООН, МКРЗ и МАГАТЭ при разработке концепций радиационной защиты осуществляется в тесном взаимодействии с другими международными организациями, такими как ОАЭ ОЭСР, ЮНЭП, МКРЕ, ФАО, МОТ и др.

Как отмечалось ранее, в настоящее время сложился определенный механизм, определивший последовательность действий при формировании современной базы регулирования радоновой проблемы. Научным комитетом по действию атомной радиации ООН была дана научная оценка уровней и эффектов воздействия радона на здоровье населения [13,14], а Всемирная организация здравоохранения, рассматривая радон как проблему общественного здравоохранения, подготовила Руководство по радону[15]. Затем Международная комиссия по радиологической защите, пересмотрев свои предыдущие рекомендации, выпустила новую публикацию по защите населения от радона в жилищах[16,18]. На основании научных оценок НКДАР ООН, новых рекомендаций МКРЗ Международное агентство по атомной энергии при участии ВОЗ разработало современные международные стандарты в области обеспечения радиационной безопасности при облучении радоном населения в жилищах[17].

На основе положений указанных международных документов, а также результатов отечественных разработок в книге рассмотрена роль радона как радиационно опасного фактора окружающей среды, даны оценки радиологических рисков при его воздействии. Особое внимание уделено вопросам регулирования защиты населения от радона.

## Литература

1. *Agricola G.* De Re Metallica. Libri VI / Agricola G. – Basle, 1556.
2. *Paracelsus* (1567). Von der Bergsucht und anderen Bergkrankheiten; s. Schriftenausdem Gesamtgebiet der Gewerbehygiene, Neue Folge. Heft 12./ J. Springer. – Berlin, 1925.
3. *Haerting F. H., Hesse W.* Der Lungenkrebs, die Bergkrankheit in den SchneebergerGruben / Vol. gericht. Med. off Gesund Wes. 1879. Vol. 30. P. 296–309; Vol. 31, P. 102–132, 313–337.
4. *Holden N.E.* History of the Origin of the Chemical Elements and Their Discoverers BNL-NCS-68350-01/10-REV, prepared for the 41<sup>st</sup> IUPAC General Assembly. [Электронный ресурс] / *Holden N.E.* Режим доступа: <http://www.pubs.bnl.gov/pubs/documents/22575.pdf> .
5. *Rutherford E.* Thorium and Uranium Radiation / *Rutherford E., Owens R.B.* – Trans Roy Soc Canada. 1899. Vol. 2. – P. 9–12.
6. *Rutherford E.A.* Radio-active Substance Emitted from Thorium Compounds / *Rutherford E.A.* – Philos. Mag., 1900, Ser. 5. Vol. 49. – P.1–14.
7. *E. Rutherford* Radioactivity Produced in Substances by the Action of Thorium Compounds / *E. Rutherford.* – Philos. Mag., 1900, Ser. 5. Vol. 49. – 161–192.
8. *Marshall J. L.* Ernest Rutherford, the «True Discoverer» of Radon / *Marshall J. L., Marshall V. R.* – Bull. Hist. Chem. 2003. Vol. 28, No 2. – а P. 76–83.
9. *Dorn E.* Die von radioaktiven Substanzen ausgesandte Emanation/ Abhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft (Halle), 1900, Vol.23, P.1–15.
10. *Гусаров И.И.* Радонотерапия / *И.И. Гусаров.* – М.: Медицина. 2000. – 200 стр.
11. *Bale W. F.* Hazards Associated with Radon and Thoron. Unpublished memorandum to the U. S. Atomic Energy Commission, 1951./ *Bale W. F.* – Health Phys. 38, 1061. – 1980.

12. *George A.C.* The history, development and present status of the radon program in the United States of America/ *George A.C.* // The 9<sup>th</sup> International Symposium on the Natural Radiation Environment (NRE-IX), 22 – 26 Sept. – Hirosaki, Japan, 2014,
13. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Volume I: Sources; Vol. II: Effects// United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes. United Nations, New York. – 2000.
14. Sources-to-Effects Assessment for Radon in Homes and Workplaces.// United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.2006 Report to the General Assembly, with scientific annexes. United Nations, New York. – 2009.
15. Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective// World Health Organisation (WHO). – Geneva: WHO Press. – 2009.
16. Руководство по защите от облучения радоном / под ред. *М.В. Жуковского, И.В. Ярмошенко, С.М. Киселева* / пер. Публикации 126 МКРЗ.// ICRP. – Москва: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России». – 2015.
17. Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation, SSG 32 // IAEA: Vienna. – 2014.
18. *Киселев С.М.* Современные подходы к обеспечению защиты населения от радона. Международный опыт регулирования / *С.М. Киселев, М.В. Жуковский* // Радиационная Гигиена т. 7. – 2014. – №4.

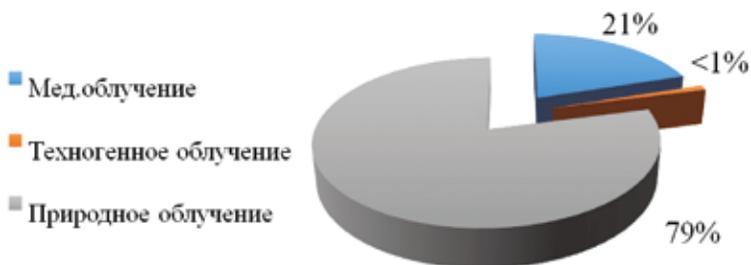
**Глава 2**  
**РАДОН КАК РАДИАЦИОННО ОПАСНЫЙ ФАКТОР**  
**ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**  
**(И.В. Яρμοшенко, М.В. Жуковский)**

*В* главе рассмотрены основные физико-химические характеристики изотопов радона и дочерних продуктов распада, обсужден их вклад в облучение населения. Описаны источники образования радиоактивного газа, механизмы его поступления и особенности распределения в воздушной среде помещений. При рассмотрении вопросов обеспечения радиационной защиты населения от данного компонента природного облучения особое внимание уделено анализу основных факторов природной среды, определяющих радоноопасность территорий и особенностям антропогенного характера содержания помещений, определяющим накопление радона во внутренней среде помещений.

**2.1. Вклад радона в облучение населения**

Современные исследования облучения населения от различных источников излучения свидетельствуют о том, что основной вклад в облучение населения вносят природные источники (рис. 2.1). Проведенные оценки среднегодовых доз облучения населения от природных источников в среднем по земному шару составляют 2,4 мЗв/год [1,2].

Значения и вклад различных природных источников в среднегодовые дозы облучения населения приведены в табл. 2.1 и на рис. 2.2.

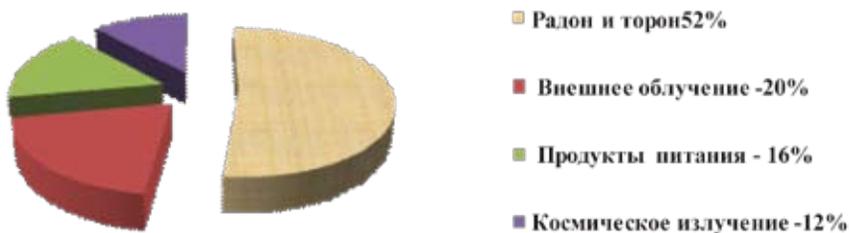


*Рис 2.1. Вклад природных источников в облучение населения [1, 2]*

*Таблица 2.1.*

**Среднегодовые дозы облучения населения от различных природных источников [1, 2]**

Источник (или путь поступления)	Средняя доза в мире, мЗв	Диапазон индивидуальных доз, мЗв
Ингаляция (радон + торон)	1,26	0,2–10
Внешнее облучение за счет природных радионуклидов	0,48	0,3–1
Поступление с продуктами питания	0,29	0,2–1
Космическое излучение	0,39	0,3–1
Итого	2,4	1–13



*Рис.2.2. Вклад различных природных источников в дозы облучения населения [1, 2]*

Представленные данные свидетельствуют о том, что основной вклад в облучение населения от природных источников вносят радон и торон. При этом доза облучения населения от радона превосходит дозы, обусловленные техногенными и медицинскими источниками ионизирующего излучения.

## 2.2. Общие характеристики изотопов радона и их ДПР

Радон – самый тяжелый из инертных газов, не имеет цвета и запаха. Температура его сжижения равна  $-62$  °С. В нормальных условиях плотность радона в 7,5 раза выше плотности воздуха. Радон-222 образуется в природе как продукт радиоактивного распада в радиоактивной цепочке, основоположником которой является  $^{238}\text{U}$ , а радон-220 – как продукт распада  $^{232}\text{Th}$  (рис. 2.3).

При описании всех членов природных радиоактивных цепочек используются не только стандартные обозначения радионуклидов, но и исторически устоявшиеся названия, встречающиеся как в литературе прошлых лет издания, так и в практической деятельности. В частности, для изотопа  $^{222}\text{Rn}$  распространено исторически используемое название «радон», а для изотопа  $^{220}\text{Rn}$  – «торон». Эти названия в последующем также будут использованы нами для простоты изложения.

В природе в ряду радиоактивного распада  $^{235}\text{U}$  существует третий изотоп радона –  $^{219}\text{Rn}$  (актинон), однако в силу короткого периода полураспада – 3,96 с и малого содержания  $^{235}\text{U}$  в окружающей среде с точки зрения радиационной безопасности он может представлять лишь теоретический интерес [3].

В настоящее время достаточно хорошо известно, что дочерние продукты распада радона и торона представляют главный путь облучения легкого преимущественно за счет альфа-частиц, излучаемых несколькими ДПР, хотя при этом они испускают также бета-частицы и гамма-излучение [4]. Энергии излучения изотопов радона и их дочерних продуктов распада представлены в справочной литературе. Так, в Публикации МКРЗ 38 приведены параметры корпускулярного

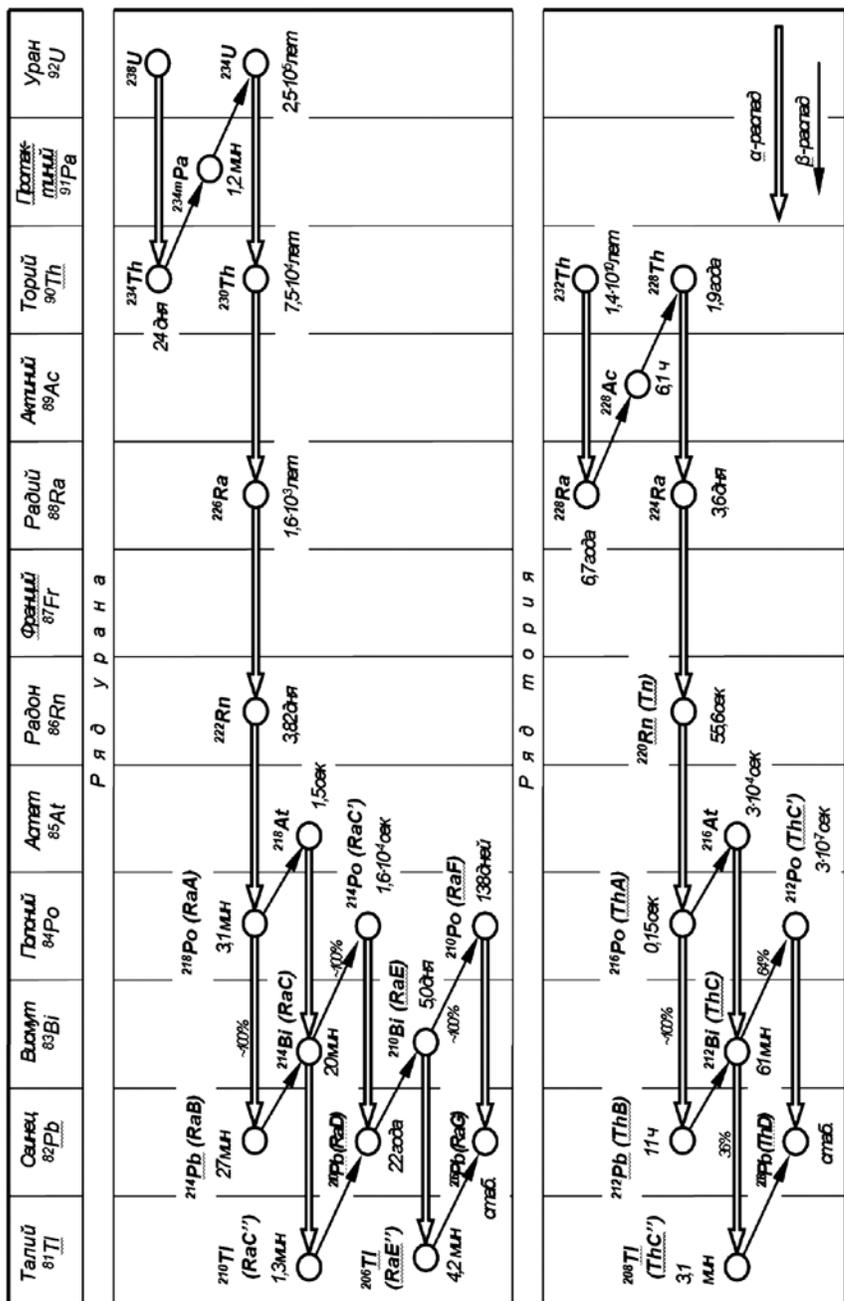


Рис. 2.3. Ряды радиоактивного распада  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  (приведены не только стандартные, но и традиционно сложившиеся обозначения элементов цепочек распада  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ )

излучения изотопов радона и их ДПР, а также энергии излучения и квантовый выход для гамма-излучающих нуклидов [4].

Рассмотрим ряд основных понятий, используемых для описания состояния изотопов радона и их дочерних продуктов распада в атмосфере. Их использование, в первую очередь, обусловлено тем, что в цепочке распада радона в воздухе всегда существует значительный сдвиг равновесия между газообразным изотопом радона и его ДПР, обусловленный различными процессами, происходящими в атмосфере.

Для описания интегральной объемной активности дочерних продуктов распада радона в воздухе часто использовалось такое понятие, как «скрытая энергия». Скрытая энергия – это суммарная энергия альфа-излучения, которая выделяется при распаде всех короткоживущих ДПР (для  $^{222}\text{Rn}$  вплоть до  $^{214}\text{Po}$ ) в единице объема воздуха.

В современной литературе более распространенным является термин «удельная потенциальная энергия альфа-излучения». Это объемная активность короткоживущих дочерних продуктов радона и торона в воздухе, выраженная в единицах энергии альфа-излучения, испускаемого любой смесью короткоживущих дочерних продуктов  $^{222}\text{Rn}$  или  $^{220}\text{Rn}$  в единице объема воздуха при полном распаде дочерних продуктов  $^{222}\text{Rn}$  до  $^{210}\text{Pb}$  или дочерних продуктов  $^{220}\text{Rn}$  до  $^{208}\text{Pb}$ .

Эквивалентной равновесной объемной активностью (ЭРОА) радона для неравновесной смеси короткоживущих дочерних продуктов распада в воздухе называется такая объемная активность радона в полном равновесии с дочерними продуктами распада, которая имеет такую же величину удельной потенциальной энергии альфа-излучения (скрытой энергии), как и данная неравновесная смесь.

Эквивалентная равновесная объемная активность  $^{222}\text{Rn}$  связана с объемными активностями  $^{218}\text{Po} - ^{214}\text{Bi}$ , а  $^{220}\text{Rn}$  соответственно с  $^{216}\text{Po} - ^{212}\text{Bi}$  следующим соотношением:

$$A_{\text{ЭКВ}}^{\text{Rn}} = A_{V0}^{\text{Rn}} \cdot F = 0,1046A_{V1} + 0,5161A_{V2} + 0,3793A_{V3} \quad (2.1)$$

$$A_{\text{ЭКВ}}^{\text{Tn}} = A_{V0}^{\text{Tn}} \cdot F = 7 \cdot 10^{-6} A_{V1} + 0,9133A_{V2} + 0,0867A_{V3}$$

где через  $A_{V0}^{\text{Rn}}$ ,  $A_{V0}^{\text{Tn}}$  обозначены соответственно объемные активности радона и торона,  $A_{V1}$ ,  $A_{V2}$  и  $A_{V3}$  – соответственно объемные активности  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  (верхнее уравнение) и  $A_{V1}$ ,  $A_{V2}$  и  $A_{V3}$  – соответственно

объемные активности  $^{216}\text{Po}$ ,  $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{212}\text{Bi}$  (нижнее уравнение),  $\text{Бк}/\text{м}^3$ . Численные значения коэффициентов отражают долевым вклад каждого продукта распада в общую потенциальную энергию альфа-излучения, отнесенную к распаду единицы активности газа.

Таким образом, измеренную объемную активность дочерних продуктов распада радона можно перевести в ЭРОА, которая прямо пропорциональна удельной потенциальной энергии альфа-излучения. ЭРОА можно перевести в удельную потенциальную энергию альфа-излучения с помощью следующих соотношений [2]:

ЭРОА 1  $\text{Бк}/\text{м}^3 \cdot 3,47 \cdot 10^4 \text{ МэВ} \cdot \text{м}^{-3} \cdot 5,56 \cdot 10^{-6} \text{ МДж} \cdot \text{м}^3$  (для радона),

ЭРОА 1  $\text{Бк}/\text{м}^3 \cdot 4,72 \cdot 10^5 \text{ МэВ} \cdot \text{м}^{-3} \cdot 7,6 \cdot 10^{-5} \text{ МДж} \cdot \text{м}^3$  (для торона).

Несмотря на то, что современной величиной для выражения объемной активности (концентрации) ДПР является ЭРОА, измеряемая в  $\text{Бк}/\text{м}^3$ , большинство результатов прошлых, а также современных измерений радона в шахтах представляются в рабочих уровнях (РУ или Working Level– WL) или в рабочих уровнях за месяц (РУМ или WLM). Первая единица является мерой удельной потенциальной энергии альфа-излучения в воздухе, а вторая – мерой экспозиции для принятой длительности рабочего месяца в 170 ч.

Если в воздухе содержится 3700  $\text{Бк}/\text{м}^3$  (100 пКи/л)  $^{222}\text{Rn}$  в полном равновесии с дочерними продуктами распада, то величина скрытой энергии будет равна  $1,2835 \cdot 10^5 \text{ МэВ}/\text{л}$ . Данная величина, округленная до  $1,300 \cdot 10^5 \text{ МэВ}/\text{л}$ , носит название рабочий уровень (РУ, WL) и до сих пор иногда используется за рубежом для определения объемной активности ДПР радона в воздухе. По определению, объемная активность ДПР, равная 1 WL, – это такое содержание любых короткоживущих дочерних продуктов распада радона (Rn, Tn, An) в воздухе, которое обеспечивает величину скрытой энергии в  $1,300 \cdot 10^5 \text{ МэВ}/\text{л}$  [5–8]. С учетом округления 1 WL соответствует ЭРОА радона 3748  $\text{Бк}/\text{м}^3$ . Для торона уровень потенциальной энергии в 1 WL создается объемной активностью 275  $\text{Бк}/\text{м}^3$   $^{220}\text{Rn}$  в полном равновесии с дочерними продуктами распада. Соответственно, для радона ЭРОА 1  $\text{Бк}/\text{м}^3 = 0,27 \text{ мРУ}$ , а для торона 1  $\text{Бк}/\text{м}^3 = 3,64 \text{ мРУ}$ .

Экспозиция, которой подвергается население или персонал предприятия при воздействии ДПР, является первичной информации

ей, необходимой для оценки радиационных рисков. Для расчета экспозиции  $P$  за период времени воздействия  $T$  используется следующее выражение:

$$P = \int_0^T A_{\text{ЭКВ}}^{Rn}(t) dt = \overline{A_{\text{ЭКВ}}^{Rn}} \cdot T, \quad (2.2)$$

где  $A_{\text{ЭКВ}}^{Rn}(t)$  – изменяющееся со временем значение эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона,  $\overline{A_{\text{ЭКВ}}^{Rn}}$  – среднее значение ЭРОА радона за период времени воздействия  $T$ . Единицей экспозиции по удельной потенциальной энергии альфа-излучения в системе СИ является Дж·ч·м<sup>-3</sup>.

Следует учитывать, что в моделях радиационного риска экспозиция по дочерним продуктам распада радона выражается в единицах WLM. Величина в 1 WLM соответствует экспозиции при ЭРОА радона равной ~3700 Бк/м<sup>3</sup> в течение 170 ч. При оценках радиационных рисков измеренные значения среднегодовой экспозиции  $P$  (Бк·ч·м<sup>-3</sup>) пересчитываются в величину экспозиции, выраженной в единицах WLM:

$$P_{WLM} = P_{\text{ЭРОА}} / (170 \cdot 3700). \quad (2.3)$$

А если строго, с учетом округления величины 1 WL до  $1,300 \cdot 10^5$  МэВ/л, то

$$P_{WLM} = P_{\text{ЭРОА}} / (170 \cdot 3748), \quad (2.4)$$

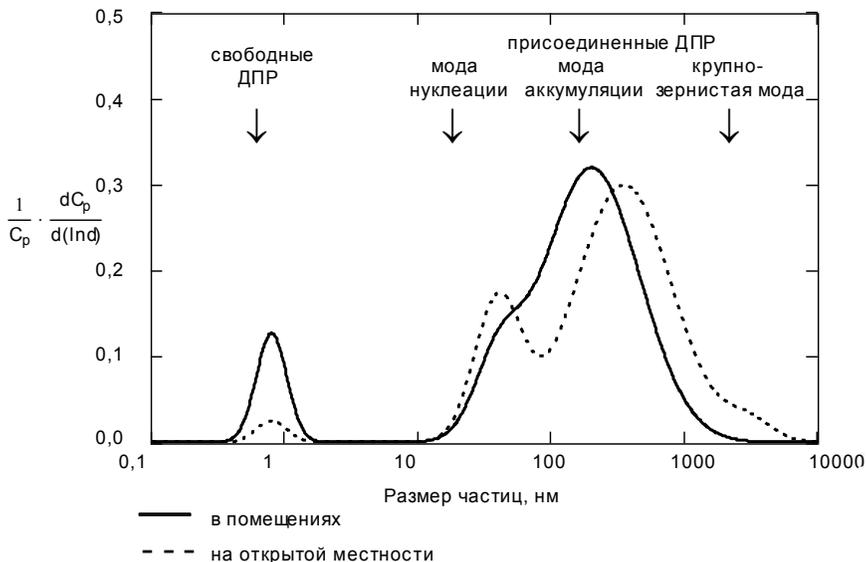
где  $P_{WLM}$  – экспозиция, выраженная в WLM,  $P_{\text{ЭРОА}}$  – экспозиция по дочерним продуктам распада радона, выраженная в единицах Бк·ч·м<sup>-3</sup>.

Поведение радона и его дочерних продуктов распада в замкнутых объемах помещений будет определяться такими процессами, как воздухообмен с внешней атмосферой, взаимодействие с аэрозолями, оседание на поверхности. В результате даже при постоянном значении объемной активности газообразного радона будет наблюдаться сдвиг равновесия между радонам и его ДПР, а также между отдельными членами радиоактивного ряда.

Для описания поведения дочерних продуктов распада радона в атмосфере В. Якоби была предложена модель [9], которая стала основой большинства используемых сегодня моделей [5, 10–13].

Инертный газ радон всегда находится в свободном состоянии. При его  $\alpha$ -распаде образуется атом  $^{218}\text{Po}$  с кинетической энергией  $\sim 100$  кэВ и, как правило, положительно заряженный. Длина пробега атома в воздухе составляет  $\sim 50$  мкм, за несколько наносекунд он теряет свою энергию при столкновениях с молекулами газа и может нейтрализоваться. Кроме того, он адсорбирует молекулы воздушного пара либо объединяется с газовыми примесями, в результате формируются мелкие частицы размером от 0,5 до 5 нм, называемые кластерами или неприсоединенными продуктами распада [9]. При последующих актах распада образуются другие короткоживущие свободные ДПР.

Продукты распада радона, мигрируя в воздухе, могут сталкиваться с атмосферными аэрозольными частицами и прилипать к ним, образуя радиоактивные аэрозоли (присоединенные продукты распада). Спектр размеров аэрозольных частиц может быть различным и, как правило, достаточно широк. Исследования показывают, что распределение аэрозольных частиц по размеру в различных условиях хорошо описывается логарифмическим нормальным распределением [9]. В общем виде распределение аэрозольных частиц может быть описано суммой трех логнормальных распределений, называемых модами. На рис. 2.4 представлены типичные распределения активности продуктов распада радона по размеру частиц [10]. По сравнению с открытой атмосферой мода аккумуляции в помещениях сдвигается в область меньших размеров, а крупнозернистая мода исчезает вследствие осаждения этих частиц на поверхностях помещения. Динамика процесса присоединения ДПР радона к аэрозолям в большой степени зависит от концентрации аэрозолей в атмосфере и их распределения по размерам. В местах с наличием источника аэрозолей, например, при работе газовой плиты, при курении в помещении, спектр принимает вид логнормального распределения с одной модой.



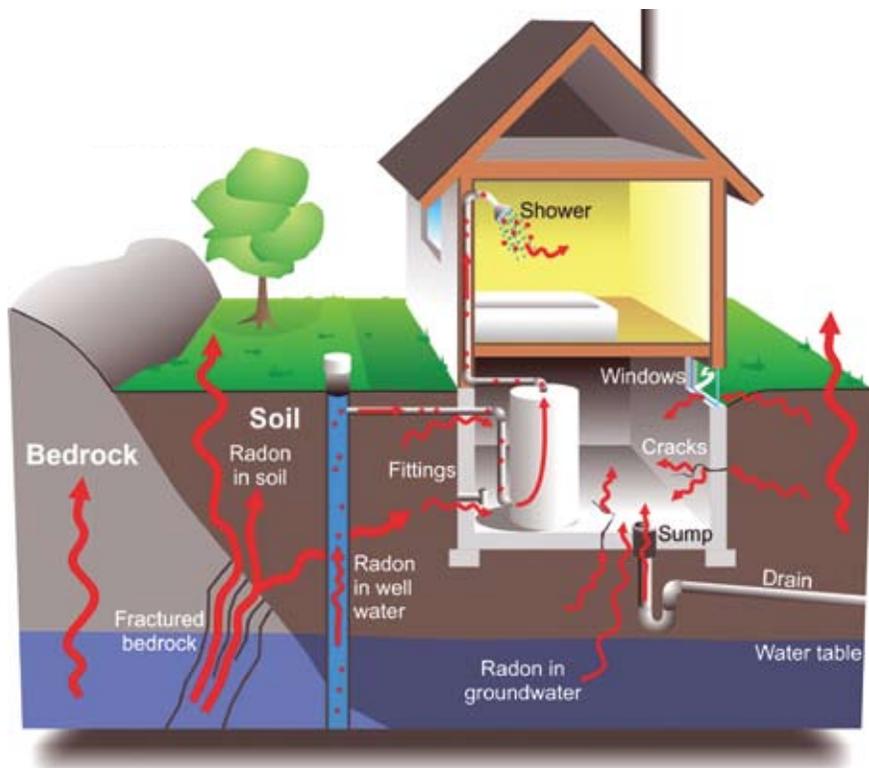
**Рис. 2.4.** Типичное распределение активности ДПР радона по размеру частиц в помещениях и на открытой местности [10]

### 2.3. Основные закономерности поступления и накопления радона в помещениях

Радон ( $^{222}\text{Rn}$ ) и торон ( $^{220}\text{Rn}$ ) поступают в атмосферу из грунта, где они образуются при распаде дочерних продуктов урана и тория, которые всегда присутствуют в земной коре. Поэтому эти радиоактивные газы обнаруживаются в том или ином количестве практически на любой территории. Наибольший выход в атмосферу имеет  $^{222}\text{Rn}$ , среднее объемное содержание которого в атмосфере составляет  $6 \cdot 10^{-18}\%$  [1,3]. Это связано с тем, что период его полураспада среди указанных радионуклидов является максимальным и составляет 3,8 суток, в то время как для торона он равен 56 с [1,4].

Преимущественным путем поступления радона и торона в организм является ингаляционный. При этом доза за счет радона составляет около 1% от дозы, создаваемой дочерними продуктами распада [3], которые, таким образом, вносят основной вклад в облучение.

Радон является инертным газом и поэтому почти не вступает в химические реакции с другими соединениями. В ходе геолого-геофизических исследований было установлено, что он способен подниматься к поверхности земли из толщи пород. В процессе миграции радон может выходить на поверхность земли вдали от источников своего образования. Пути поступления радона в помещение приведены на рис. 2.5. Учитывая, что радон тяжелее воздуха, он накапливается в атмосферном воздухе подвалов (погребов), поступая оттуда на первые этажи зданий. Кроме того, в отопительный период внутри помещений создается пониженное по сравнению с атмосферным давление, что также способствует еще большему накоплению радона на нижних этажах зданий.



**Рис 2.5.** Пути поступления радона в помещение  
([http://ihe.ru/ufiles/Akcii/radon\\_b.jpg](http://ihe.ru/ufiles/Akcii/radon_b.jpg))

Таким образом, радон находится в воздухе помещений независимо от конструкции здания, а его накопление связано с комплексом причин, который включает:

- присутствие источника радона – радия ( $^{226}\text{Ra}$ ) – в грунте непосредственно под зданием и в материалах, из которых построено само здание;
- наличие путей миграции радона между источником радона и помещениями;
- действие движущей силы, побуждающей воздух, содержащий радон, поступать внутрь здания;
- наличие путей проникновения радона внутрь оболочки здания;
- ограниченный воздухообмен между помещениями и внешней атмосферой.

При распаде радия в грунте или строительном материале атом радона получает энергию, необходимую для выхода из зерен материала в поровое пространство. Этот процесс называется эманированием и описывается коэффициентом эманирования, равным отношению числа атомов, вышедших в поровое пространство к общему числу образовавшихся атомов радона. Коэффициент эманирования зависит от характера распределения радия по объему зерна, размера зерен, размера пор и пустот, а также влажности. Разброс значений коэффициента эманирования достаточно широк, для пород и почв он лежит в интервале 0,1–0,3, для большинства минералов его значение составляет менее 0,1 [14].

В поровых пространствах радон переносится путем диффузии при наличии градиента концентрации или вместе с конвективным потоком воздуха при наличии градиента давления (инфильтрация).

В соответствии с законом Фика плотность диффузионного потока и градиент концентрации радона связаны коэффициентом молекулярной диффузии радона в соответствующей среде. Коэффициент молекулярной диффузии радона в воздухе равен примерно  $1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ , в воде –  $1 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$  [14]. В поровом пространстве диффузия зависит также от пористости среды и извилистости пор. Плотность потока радона через пористый материал, например грунт, описывается уравнениями:

$$f_D = -\varepsilon\tau D_M \nabla C = -\varepsilon D \nabla C = -D_e \nabla C, \quad (2.5)$$

где  $f_D$  – плотность потока радона (Бк/м<sup>2</sup>с),  $\varepsilon$  – пористость,  $\tau$  – коэффициент извилистости (для почв принимается равным 0,66 [14]),  $D_M$ ,  $D$ ,  $D_e$  – коэффициенты молекулярной, объемной и эффективной диффузии (м<sup>2</sup>/с),  $\nabla C$  – градиент ОА радона (Бк/м<sup>3</sup>). Для описания скорости эксхалации радона с поверхности грунта в атмосферу за счет диффузии предложено следующее уравнение [2]:

$$f_{DS} = C_{Ra} \lambda_{Rn} E \rho_S (1 - \varepsilon) \sqrt{\frac{D_e}{\lambda_{Rn}}} \quad (2.6)$$

где  $C_{Ra}$  – удельная активность радия-226, Бк/кг;  $\rho_S$  – плотность зерен грунта, кг/м<sup>3</sup>;  $E$  – коэффициент эманирования;  $D_e$  – эффективный коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $\varepsilon$  – пористость материала,  $\lambda_{Rn}$  – постоянная распада радона.

Для расчета плотности потока радона с поверхности строительных материалов используется выражение [2]:

$$f_{DBM} = C_{Ra} \lambda_{Rn} \rho_{BM} E \sqrt{\frac{D_e}{\lambda_{Rn}}} \tanh\left(d \sqrt{\frac{\lambda_{Rn}}{D_e}}\right) \quad (2.7)$$

где  $\rho_{BM}$  – объемная плотность строительного материала;  $d$  – половина толщины слоя материала.

Конвективный перенос (фильтрация) радона в пористой среде описывается в соответствии с законом Дарси:

$$f_c = C_c \frac{-k}{\mu} \nabla p \quad (2.8)$$

где  $f_c$  – плотность потока радона за счет конвекции (Бк·м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>),  $C_c$  – ОА радона в конвективном потоке воздуха (Бк/м<sup>3</sup>),  $k$  – проницаемость (м<sup>2</sup>),  $\mu$  – динамическая вязкость воздуха (Па·с),  $\nabla p$  – градиент давления (Па/м).

С учетом того, что динамическая вязкость воздуха – практически постоянная величина, ключевой характеристикой почвы для описания конвективного переноса является проницаемость. Воздухопро-

нищаемость почвы изменяется в очень широких пределах, от менее чем  $10^{-16}$  м<sup>2</sup> (глина) до  $10^{-8}$  м<sup>2</sup> (щебень) [2].

Объемная активность радона в помещении здания зависит от скорости поступления и кратности воздухообмена. Следующее дифференциальное уравнение описывает изменение ОА радона в помещении (С) со временем (t), с учетом допущения о мгновенном равномерном распределении по объему:

$$\frac{dC}{dt} = \sum_i a_i - C(\lambda_{Rn} + \lambda_v) \quad (2.9)$$

где  $a_i$  – скорость поступления радона из i-го источника в единичный объем помещения, Бк/(м<sup>3</sup>·с);  $\lambda_v$  – скорость воздухообмена в помещении, с<sup>-1</sup>. В результате решения дифференциального уравнения (2.9):

$$C = \frac{\sum_i a_i}{\lambda_{Rn} + \lambda_v} (1 - e^{-(\lambda_{Rn} + \lambda_v)t}) + C_0 e^{-(\lambda_{Rn} + \lambda_v)t} \quad (2.10)$$

где  $C_0$  – объемная активность радона в начальный момент времени, Бк/м<sup>3</sup>.

Уравнение (2.10) можно упростить, принимая, что условия поступления и накопления радона являются равновесными (т. е.  $t \rightarrow \infty$ ) и в наиболее вероятном диапазоне значений скорости воздухообмена  $\lambda_v \gg \lambda$  [1]:

$$C = \frac{\sum_i a_i}{\lambda_v} \quad (2.11)$$

Основными источниками и механизмами поступления радона в зданиях, которые входят в число слагаемых в уравнении (2.11), являются:

- грунт под зданием, при этом перенос радона может осуществляться как с конвективными потоками воздуха, так и путем диффузии,
- эксхалация радона из строительных материалов,
- атмосферный воздух, который поступает в помещения при проветривании,
- вода, используемая в здании, если в ней растворен радон.

Скорость диффузионного поступления может быть выражена через плотность потока радона,  $f_D$ :

$$a_D = \frac{\sum_j f_{Dj} S_j}{V}, \quad (2.12)$$

где  $f_{Dj}$  – скорость эксхалиции радона с  $j$ -й поверхности, Бк/(м<sup>2</sup>·с), площадь которой равна  $S_j$ , м<sup>2</sup>;  $V$  – объем помещения, м<sup>3</sup>. Скорость потока из почвы в помещение, соприкасающееся с почвой, описывается уравнением (2.6), эксхалиция с поверхности строительных конструкций – уравнением (2.7).

Конвективные потоки, которые переносят радон из грунта под зданием или между помещениями здания, например, из подвала в жилые комнаты, обусловлены разницей давлений в помещении и наружной атмосфере. Эта разница давлений создается восходящим потоком нагретого воздуха внутри здания (так называемый стек-эффект), а также ее связывают с воздействием ветра. В наиболее общем виде скорость конвективного поступления радона,  $a_C$ , описывается уравнением:

$$a_C = \frac{\sum_j f_{Dj} S_j}{V}, \quad (2.13)$$

где  $F_C$  – скорость конвективного потока воздуха (м<sup>3</sup>/с), поступающего в помещение,  $C_C$  – объемная активность радона в почвенном воздухе или в пространстве, непосредственно расположенном под помещением (подвал, подпольное пространство). Если скорость конвективного потока пропорциональна разности давлений и обратно пропорциональна сопротивлению конструкции здания, тогда:

$$a_C = C_C \frac{\Delta P}{R_C} V^{-1}, \quad (2.14)$$

где  $\Delta P$  – разность давлений, обуславливающая конвективный поток, Па;  $R_C$  – общее сопротивление конструкции здания поступлению конвективного потока воздуха, Па·с·м<sup>3</sup>.

Существует несколько подходов к более детальному описанию скорости конвективного поступления. Разность давлений в почвенном воздухе и в помещении на уровне пола связывается с разницей

температур в помещении,  $T_{in}$ , и в наружной атмосфере,  $T_{out}$ , и уровне нейтрального давления  $H_{npl}$  (Neutral Pressure Level). В результате стек-эффекта наблюдается градиент давлений по высоте помещения: восходящие потоки теплого воздуха создают разрежение в нижней части помещения с минимумом на уровне пола. На высоте  $H_{npl}$  над уровнем пола достигается равенство давлений внутри и снаружи здания. Тогда [15]:

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot H_{npl} \cdot \frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in}}, \quad (2.15)$$

где  $\rho$  – плотность наружного воздуха;  $g$  – ускорение свободного падения.

Модель инфильтрации, созданная в Берклиевской лаборатории (США) в рамках проектов по разработке основ энергосберегающей эксплуатации зданий [16, 17], связывает инфильтрацию воздуха с характеристиками здания и климатическим параметрами. Ключевой характеристикой здания выступает эффективная площадь натекания,  $S_{ELA}$ . Этот параметр равен площади открытых участков в оболочке здания, через которые воздух может поступать или выходить из здания. Применение параметра  $S_{ELA}$  упрощается тем, что была создана и отработана экспериментальная процедура его измерения (так называемая система BlowerDoor [17]). Кроме того, в модели используются стек-параметр,  $f_s$  и ветровой параметр,  $f_w$  [16, 17]. Для всех трех параметров могут быть приняты некоторые средние значения для групп близких по конструкции зданий, расположенных в одной климатической зоне. Окончательно скорость конвективного потока воздуха определяется выражением [16]:

$$F = S_{ELA} \sqrt{(f_s (T_{in} - T_{out})^{0,65})^2 + (f_w v)^2}, \quad (2.16)$$

где  $S_{ELA}$  – эффективная площадь натекания,  $m^2$ ;  $v$  – метеорологическая скорость ветра,  $m/s$ .

Если  $F$  определяет скорость конвективного поступления воздуха, а  $V$  – объем помещения, то отношение этих величин задает скорость воздухообмена помещения за счет конвективного потока и может быть определена как часть,  $f$ , общей скорости воздухообмена

помещения. То есть скорость конвективного поступления радона пропорциональна скорости воздухообмена:

$$a_c = C_c \cdot f \cdot \lambda_v. \quad (2.17)$$

Подобный подход для описания скорости конвективного поступления был использован в обзорах НКДАР ООН. В обзоре 1996 г. использован параметр  $f_{\text{soil}}$ , который определяет долю только почвенного воздуха в общем воздухообмене, а в качестве  $C_c$  рассматривается объемная активность радона в почвенном воздухе  $C_{\text{soil}}$  [1]. Отмечается, что значение  $f_{\text{soil}}$  находится в диапазоне 0,02–2%. Приблизительную оценку параметра  $f_{\text{soil}}$  можно провести по отношению ОА радона в помещении к ОА радона в почве. По результатам исследований, выполненных в Германии [18], это отношение связано с типом здания. На первых этажах зданий с подвалом отношение  $C/C_{\text{soil}}$  составляет в среднем примерно 0,1% в новых и до 0,2% в старых домах. В зданиях без подвального помещения отношение  $C/C_{\text{soil}}$  увеличивается в 2–3 раза.

Часто при моделировании выделяют некоторое подпольное пространство (подвал, подполье и т. п.), которое служит промежуточным звеном при переносе радона из почвенного воздуха в жилое помещение, при этом рассматривают конвективный поток воздуха в жилище из подвала, а не из почвы. Тогда  $C_c$  равна объемной активности радона в подпольном пространстве и  $f_{\text{bas}}$  – доля воздухообмена с этим пространством в общей скорости воздухообмена. В работе [19] проведена оценка величины  $f_{\text{bas}}$  для типичного голландского дома, были получены значения в диапазоне 20–60%. В России достаточное совпадение прогнозируемых и наблюдаемых значений объемной активности радона в городских зданиях отмечено при значениях  $f_{\text{bas}}$  больше 10% [20].

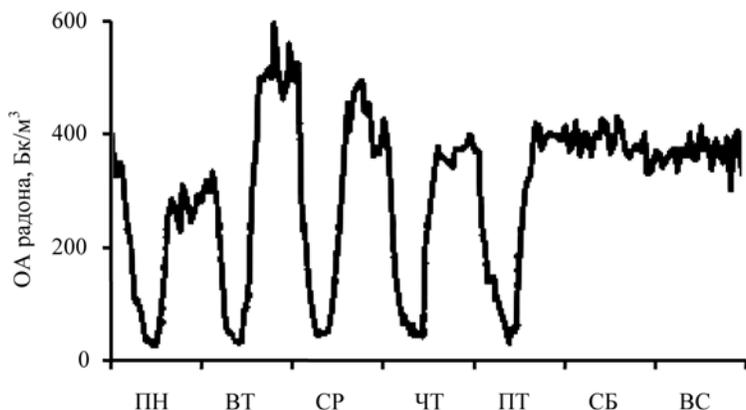
Для домов, где источником водоснабжения является артезианская скважина, потенциальным источником радона может являться вода, используемая для хозяйственных и бытовых нужд. При контакте воды с атмосферой помещения (особенно при разбрызгивании воды) происходит выделение растворенного в воде радона в воздух.

Только для растворенного в воде радона наблюдается его непосредственный выход в атмосферу помещения. Выделение радона

из воды происходит тем интенсивнее, чем больше площадь контакта воды с атмосферой и чем выше температура воды, т. е. при использовании душа, существенно меньшее – при стирке, уборке помещений и приготовления пищи.

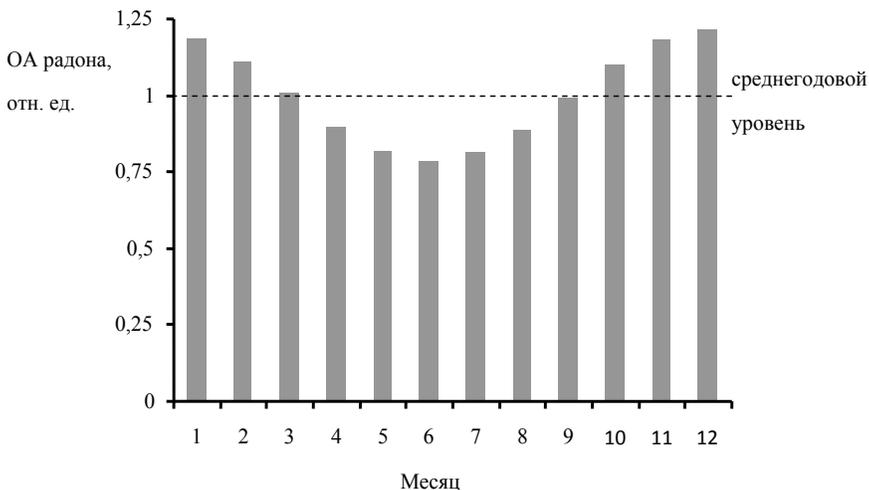
Ряд параметров, которые оказывают влияние на поступление и накопление радона в помещениях, изменяются во времени. К ним относятся: скорость потока радона с поверхности грунта, разность давлений и температур внутри и снаружи здания, кратность вентиляции в помещении и др. Соответствующие вариации претерпевает объемная активность радона в помещениях. По периоду проявления вариации ОА радона в жилищах подразделяют на суточные, сезонные и долгосрочные.

Суточные вариации связаны с дневным ходом температуры и различным характером режима содержания помещения днем и ночью. Пример суточных вариаций объемной активности радона показан на рис. 2.6, содержащем результаты измерений с применением радон-монитора в детском саду. Как видно на рисунке, в данном помещении минимальное накопление радона регистрируется в дневное время в будние дни при поддержании режима достаточно интенсивного проветривания. Ночью и в выходные, при отсутствии персонала и детей, т. е. минимальном воздухообмене, создаются условия для максимального накопления радона.



*Рис. 2.6. Вариации ОА радона в течение недели в помещении детского дошкольного учреждения*

Сезонные вариации связаны со значительными циклическими различиями температуры атмосферного воздуха и других метеорологических параметров в течение года. Характер сезонных вариаций в различных зданиях может различаться. Считается, что в большинстве жилых помещений максимальная активность радона устанавливается в зимний, холодный период, минимальная в летний, теплый. По данным исследования в жилищах Великобритании [21], такой годовой ход ОА радона (рис. 2.7) наблюдался в 68% помещений. В качестве основных причин повышения накопления радона зимой рассматриваются снижение интенсивности проветривания и усиление стек-эффекта, который приводит к увеличению доли воздухообмена, приходящейся на почвенный воздух.



**Рис. 2.7.** Средняя месячная ОА радона в жилищах Великобритании, выраженная относительно среднегодового значения [21]

В некоторых исследованиях также было установлено наличие многолетнего тренда изменения ОА радона. В среднем в зависимости от срока эксплуатации наблюдается возрастание ОА радона в домах. Это связано с ухудшением состояния строительных конструкций зданий со временем, появлением новых щелей и т. п., что приводит к уве-

личению параметра  $S_{ELA}$ . Кроме того, высказывалось предположение, что кратность воздухообмена в домах, в которых постоянно проживает одна семья, со временем снижается по мере старения жителей, взросления и отъезда детей.

Наличие существенных дневных и сезонных вариаций накладывает ограничения на методы измерения и методики проведения радонового обследования жилищ. В нормативных и рекомендательных документах, как российских, так и международных, в качестве нормируемых и референтных величин используется среднегодовая объемная активность радона.

#### **2.4. Основные геогенные и антропогенные факторы радоноопасности**

Факторы, которые в комплексе обуславливают степень радоноопасности территорий и отдельных зданий, могут быть отнесены к одной из трех больших групп:

- геогенный радоновый потенциал,
- конструкция здания,
- режим содержания помещений.

В результате анализа этих факторов определяют радоновый потенциал, который численно или качественно отражает возможность повышенного поступления радона в помещения существующих и будущих зданий. Ранжирование по степени потенциальной радоноопасности проводится путем сравнения ожидаемых величин с некоторыми граничными значениями либо с характеристиками облучения на других территориях. С учетом установленного радонового потенциала проводится прогнозирование уровней поступления радона в зданиях и определение первоочередных мер по защите населения.

Геогенный радоновый потенциал описывает геологическое пространство под зданием как источник радона, это понятие объединяет радоновыделение геологической среды и условия для переноса радона из грунта в атмосферу. По определению геогенный радоновый по-

тенциал не зависит от антропогенных факторов. Другим его важным свойством является постоянство во времени. Радоновыделение среды можно оценить с учетом таких радиационно-физических свойств грунта, как содержание  $^{238}\text{U}$ , родоначальника ряда распада, или  $^{226}\text{Ra}$ , материнского по отношению к  $^{222}\text{Rn}$  изотопа, и коэффициента эманирования грунта:

$$P_{Rn} = C_{Ra} \rho E, \quad (2.18)$$

где  $P_{Rn}$  – радоновый потенциал грунта в однородной среде с низкой проницаемостью, в которой перенос радона происходит только вследствие диффузии [22].

М. Незнал с соавторами [23] предложил эмпирическую формулу оценки радонового потенциала площадки, RP, которая учитывает ОА радона в почвенном воздухе и проницаемость почвы:

$$RP = \frac{C_{soil} - 1}{-\log_{10}(k) - 10}, \quad (2.19)$$

где  $C_{soil}$  – ОА радона в почвенном воздухе, кБк/м<sup>3</sup>;  $k$  – проницаемость, м<sup>2</sup>.

При низкой проницаемости грунта, когда  $\log_{10}(k) > 12$ , величины радонового потенциала по формулам (2.18) и (2.19) коррелируют. Радоновый потенциал газопроницаемой среды при  $\log_{10}(k) < 12$  значительно возрастает. Определенный недостаток формулы Незнала для оценки радонового потенциала территорий – это ее эмпирический характер и сложность определения величины проницаемости.

Косвенными индикаторами геогенного радонового потенциала являются удельная активность материнского радия-226, ОА радона в почвенном воздухе и плотность потока радона с поверхности грунта. Также в качестве индикатора геогенного радонового потенциала применяется ОА радона в подвальных помещениях и на первых этажах существующих зданий.

Широкое применение эманационных методов поисков и разведки урановых руд и ореолов рассеяния радиоактивных элементов позволило получить данные о закономерностях формирования поля ОА радона в почвенном воздухе [24–26]. Характерный диапазон ОА радона в подпочвенном воздухе на платформенных территориях со-

ставляет от 5 до 50 кБк/м<sup>3</sup>, значения выше 100 кБк/м<sup>3</sup> связываются с месторождениями радиоактивных руд либо с зонами аномального транспорта радона. Радон в пористых средах переносится в основном путем диффузии при скорости переноса, зависящей от пористости и проницаемости почвы, или путем конвекции при наличии трещин и разломов. Различают конвективный перенос радона в почвенном профиле и глубинный перенос. Движущей силой конвекции в приповерхностном почвенном слое являются градиенты давления, температуры и влажности на границе раздела почва–атмосфера. Газопроницаемость почвенного слоя зависит от наличия макропор и влажности почвы. Конвективный перенос радона с больших глубин может происходить в складчатых областях, в зонах геодинамической активности земной коры. Предполагается, что в этих зонах естественная конвекция происходит по активным тектоническим разломам вследствие высокого геотермического градиента.

Оценка скорости переноса радона затруднена ввиду большого числа влияющих факторов и действующих сил. П. С. Микляев с соавторами [28–31] провел анализ данных поисковой геофизики и пришел к выводу, что на платформенных территориях радон поступает в приповерхностные отложения с глубины не более 10–15 м. По-видимому, большее расстояние от материнского радия радон может преодолевать в складчатых областях. При наличии осадочного покрова слой грунта, за счет эманирования которого формируется подавляющая часть потока радона с поверхности, составляет 0,5–10 м [26, 27]. В песчанно-глинистых средах при преимущественно диффузионном переносе ОА радона отражает удельную активность радия на глубине нескольких метров.

В целом, говоря о применении эмансионного метода для оценки геогенного радонового потенциала, следует сказать, что ограничения этого подхода связаны с высокой вариабельностью ОА радона в почвенном воздухе, которая в свою очередь обусловлена большим числом факторов, влияющих на формирование радонового поля помимо содержания радия и эманирующей способности грунтов.

Постоянный градиент концентраций на границе почвы и атмосферы обуславливает относительно стабильный поток радона из по-

чвы в атмосферу. В то же время градиент давления в почвенном разрезе вызывается разнонаправленными и нестабильно действующими факторами. Поэтому в целом формируется нестабильный суммарный перенос радона за счет диффузии и конвекции, что определяет ограничения применения плотности потока радона (ППР) с поверхности почвы для характеристики геогенного радонового потенциала. Определение ППР не требует учета проницаемости грунта, и теоретически она непосредственно характеризует интенсивность выделения радона из грунта. Привлекательность величины ППР для оценок радоноопасности определяется очевидной интерпретацией величины ППР как фактора, который можно непосредственно учитывать в простой модели накопления радона в ограниченном пространстве, а также наличием несложных средств и методов измерения.

В то же время, как указывают исследователи, проанализировавшие большой массив данных по формированию радоновых полей грунтовых массивов, оценка радоноопасности только на основе однократного измерения ППР обладает высокой неопределенностью [26]. Изменение условий переноса радона в грунте после постройки здания также ограничивает применение величины ППР для прогнозирования ОА радона в помещениях здания, если не учитывается проницаемость грунта и распределение удельной активности природных радионуклидов по глубине.

Часто проводят качественную оценку геогенного радонового потенциала (низкий, средний, высокий и т. п.) на основе доступной геологической информации, например, карт коренных пород и четвертичных отложений. В ходе анализа геологические образования ранжируют по эманлирующей способности и условиям транспорта радона. В случае отсутствия прямых данных измерений удельной активности природных радионуклидов, коэффициента эмманирования, проницаемости и других необходимых параметров можно использовать характеристики, полученные для геологических образований сходного возраста и литологического состава на других территориях. Дополнительными факторами, которые локально повышают радоноопасность, являются разломы и современная тектоническая активность. Связь между геогенным радоновым потенциалом была продемонстриро-

вана различными авторами с применением дисперсионного анализа результатов обследований ОА радона в жилищах [32–34].

Рассмотрим кратко методы оценки радонового потенциала, применяемые в разных странах.

В США для Агентства по охране окружающей среды разработана матрица радоноопасности [35], которая используется для определения ранга радоноопасности округов. В матрице учитываются пять факторов: геологическое строение, данные аэро-гамма-съёмки и других измерений, проницаемость и влажность почвы, результаты измерений ОА радона в помещениях и тип здания. По каждому из факторов радоноопасность оценивается по трехбалльной шкале, от меньшей к большей. Затем рассчитывается индекс радоноопасности как сумма баллов. В соответствии критериями, принятыми в США, к радоноопасным округам отнесены территории с индексом 12-17, здесь ожидаемая средняя ОА радона превышает 148 Бк/м<sup>3</sup>. К радонобезопасным отнесены территории с индексом 3–8, в которых можно ожидать, что средняя ОА радона не превышает 74 Бк/м<sup>3</sup>. Для остальных округов установлена умеренная степень радоноопасности.

В Великобритании радоноопасность оценивается по вероятности превышения норматива ОА радона в жилищах по результатам измерений [36]. Территория Великобритании разделена на участки по сети 1x1 км<sup>2</sup>. Для каждого участка по геологической карте масштаба 1:50 000 определены коренные породы и поверхностные отложения и собраны данные по результатам измерений объемной активности радона в жилищах. Для участков, на которых не проведено достаточное количество измерений, вероятность превышения норматива ОА радона в жилищах оценена по соседним участкам со сходным геогенным радоновым потенциалом. Согласно критерию, принятому в Великобритании, радоноопасными считаются территории, на которых в более чем 1% домов объемная активность радона превышает 200 Бк/м<sup>3</sup>.

В Чешской Республике и некоторых других странах в качестве характеристики радоноопасности используется радоновый индекс, RI, который определяется по результатам оценки радонового потенциала по формуле (2.20) [23]. Низкий радоновый индекс присваивается территории, если  $RP < 10$ , средний, если  $10 \leq RP < 35$ , и высокий,

если  $RP \geq 35$ . Этот метод применяется также для оценки радоноопасности участков под строительство. Если численное значение проницаемости грунта неизвестно, используется качественная экспертная оценка – высокая, средняя или низкая проницаемость. После этого радоновый индекс оценивается по табл.2.2. К настоящему времени в Чешской Республике составлена карта радонового индекса на основе геологической карты масштаба 1:50 000 [23].

*Таблица 2.2.*

**Качественная оценка радонового индекса  
по объемной активности радона  
в почвенном воздухе и проницаемости грунта [23].**

$C_{soil}$ , кБк/м <sup>3</sup>	Проницаемость грунта		
	низкая	средняя	высокая
0–10	низкий RI	низкий RI	низкий RI
10–20	низкий RI	низкий RI	средний RI
20–30	низкий RI	средний RI	средний RI
30–70	средний RI	средний RI	высокий RI
70–100	средний RI	высокий RI	высокий RI
>100	высокий RI	высокий RI	высокий RI

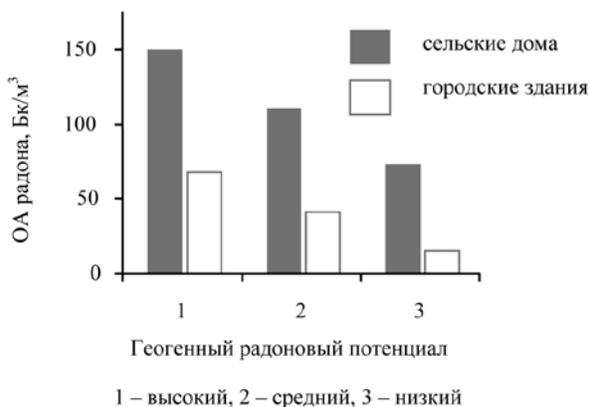
Во Франции измерения объемной активности радона в почве не распространены, поэтому при оценке потенциальной радоноопасности эта величина не учитывается [37]. Карта геогенного радонового потенциала построена на основе геологической карты масштаба 1:1 000 000 и информации о содержании урана в породах. Геологические образования подразделяются на 5 классов по радоновому потенциалу. Категория радоноопасности повышается до следующей градации при наличии факторов, повышающих проницаемость грунта и способствующих миграции радона, таких как разломы, недавняя сейсмическая активность, наличие подземных выработок, а также термальных источников.

В Европейском союзе объединенными усилиями создается Карта геогенного радонового потенциала Европы (КГРП), которая является частью Европейского атласа естественной радиоактивности [38]. Эта карта будет использоваться для определения территорий, на которых следует ожидать повышенного поступления радона из грунта в существующих и проектируемых зданиях. Методические сложности, возникшие при построении этой карты, обсуждаются в [39]. Первый пробный вариант карты был создан на основе данных о крупных геологических образованиях как первичной единицы картирования и определения их относительного радонового потенциала по следующей градации: низкий, умеренный, повышенный или высокий. На первом этапе радоновый потенциал оценивался на основе имеющихся данных национальных карт геогенного потенциала радона.

В России оценка потенциальной радоноопасности входит в комплекс инженерно-экологических изысканий при строительстве. Основой создания системы оценки радоноопасности участков под строительство в нашей стране являются измерения плотности потока радона (ППР) с поверхности грунта [40–42]. В качестве критерия оценки радоноопасности участка, при превышении которого необходимо внесение в проект здания или сооружения радонозащитных мер, нормативными документами регламентировано значение ППР  $80 \text{ мБк/м}^2 \text{ с}^{-1}$  для жилых и общественных зданий и  $250 \text{ мБк/м}^2 \text{ с}^{-1}$  – для промышленных [43].

В мире достаточно активно изучались различия в накоплении радона в разных типах и конструкциях зданий. Оказалось, что архитектурно-строительные факторы влияют на вариабельность величины ОА радона примерно в той же степени, что и геогенный потенциал. На рис. 2.7 показаны средние ОА радона в квартирах многоэтажных городских зданий и в одноэтажных домах сельских жителей Свердловской области в зависимости от степени радоноопасности территории, определенной ранее специалистами в области поисков и разведки урановых руд, в первую очередь эманационным методом [34]. Как видно на этом рисунке, существует значительная разница среднего уровня ОА радона как в зависимости от геогенного потенциала, так и типа здания. В пределах территории с низким радоновым

потенциалом накопление радона в сельских домах выше, чем в городских зданиях на территории с высоким радоновым потенциалом.



**Рис. 2.8.** Средняя ОА радона в домах сельского и городского типа в зависимости от геогенного радонового потенциала (Свердловская область [34])

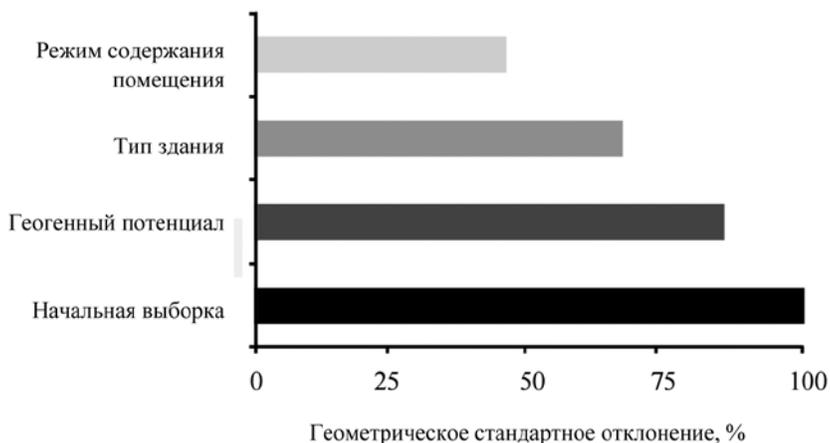
Рассмотрим основные архитектурно-строительные факторы, которые оказывают влияние на поступление и накопление радона в зданиях. Первая группа факторов относится к конструкции фундамента здания. Например, проницаемая гравийная подушка под фундаментом создает условия для переноса радона в грунте. Также такому переносу способствует наличие неперекрытых путей переноса радона из грунта в подземную часть здания или подвальное помещение. Поступление радона из подземной в наземную часть здания и далее на верхние этажи зависит от степени изоляции уровней здания друг от друга. Роль такой изоляции выполняют плиты перекрытия, монолитные конструкции и т. п. Путем переноса радона с нижнего уровня здания на верхние могут являться каналы внутренних коммуникаций здания. Их состояние, наличие негерметичных стыков и проемов систем водопотребления, водоотведения, электроснабжения, связи и т. п. рассматриваются как один из факторов радоноопасности здания.

Повсеместное применение в последние годы мер по сбережению тепла оказывает заметное негативное влияние на уровни облучения населения радоном в жилищах. Снижение проницаемости оболочки здания (за счет непроницаемых внешних конструкций, установки стеклопакетов, остекления лоджий, дополнительных тамбуров и т. п.) приводит к существенному понижению скорости воздухообмена в помещении. Особенно это проявляется в режиме эксплуатации помещения с закрытыми окнами и форточками, когда отсутствует поступление свежего воздуха. Если основным механизмом поступления радона является диффузия из строительных материалов, ОА радона увеличивается пропорционально снижению кратности воздухообмена. Величина ОА радона в зданиях с низкой проницаемостью внешней оболочки и недостаточной скоростью вентиляции может быть еще выше в случае применения строительных материалов с повышенным содержанием природных радионуклидов и высоким коэффициентом эманирования.

Группу антропогенных факторов, которые определяют накопление радона в зданиях, дополняют характеристики режима содержания помещений. Режим содержания зависит не только от назначения помещения, но и от индивидуальных предпочтений жителей. В наиболее общем виде режим содержания жилых помещений может быть описан характерными величинами кратности воздухообмена в жилище [44, 45].

В работе [46] был проведен сопоставительный анализ влияния различных типов факторов, геогенных и антропогенных, на поступление и накопление радона в жилищах. Анализировалась дисперсия логарифма ОА радона в выборках при последовательном выделении подгрупп однородных по обобщенным оценкам геогенного радонового потенциала, типа здания и режима содержания помещения. Как показано на рис. 2.9, геометрическое стандартное отклонение на каждом шаге, повышающем однородность выборки, снижается на 15–20%, и на половину после учета всех факторов вместе. В то же время величина ОА радона в самой однородной группе остается достаточно вариабельной (примерно 50% от начальной), что указывает на невозможность точного численного прогноза ОА радона в помещении на

основании усредненных данных о геогенном радоновом потенциале, типе здания и режиме содержания помещения.



**Рис. 2.9.** Относительное изменение стандартного геометрического отклонения при выделении из общей выборки подгрупп, однородных по геогенному радоновому потенциалу и антропогенным факторам [44]

### Литература

1. Sources and effects of ionizing radiation. // United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1993 Report to the General Assembly, with scientific annexes. – United Nations: New York. – 1993.
2. Exposure from Natural Radiation Sources. Report: Annex B // United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York. – 2000.
3. Crawford D. J. Radiological characteristics of  $^{219}\text{Rn}$  / Crawford D. J. // Health Phys. 1980. Vol. 39. N 3. – pp. 449–461.
4. Схема распада радионуклидов. Энергия и интенсивность излучения: Публикация 38 МКРЗ, в 2-х ч.: Пер. с англ.– М.: Энергоатомиздат, 1987.

5. *Крисюк Э.М.* Радиационный фон помещений/ *Э.М. Крисюк.* – М.: Энергоатомиздат. – 1989.
6. *Evans R.D.* Engineer's guide to the elementary behavior of radon daughters/ *R.D. Evans* // *Health Phys.* 1969. Vol. 17. – pp. 229–252.
7. *Raabe O.G.* Concerning the interaction that occur between radon decay products and aerosols/ *O.G. Raabe* // *Health Phys.* 1969. Vol. 17. – pp. 177–185.
8. *Swedjemark G.A.* The equilibrium factor F / *G.A. Swedjemark* // *Health Phys.* 1983. Vol. 45, N2. – pp. 453–462.
9. *Jacobi W.* Activity and potential alpha energy of Rn–222 and Rn–220 daughters in different air atmospheres/ *W. Jacobi* // *Health Phys.* 1972. Vol. 22 (5). – pp. 441–450
10. *Porstendorfer J.* Radon: measurements related to dose/ *J. Porstendorfer* // *Environmental International.* 1996. Vol. 22, Suppl. 1. – pp. S563–S583.
11. *Porstendorfer J.* Radon: characteristics in air and dose conversion factors/ *J. Porstendorfer, A. Reineking* // *Health Physics.* 1999. Vol. 76 (3). P. 300–305.
12. *Porstendorfer J., Reineking A.* Radon characteristics related to dose for different living places of the human/ *J. Porstendorfer, A. Reineking* // *Proceedings of IRPA 10th Congress.* – Hiroshima, 2000.
13. *Жуковский М.В.* Радон: измерение, дозы, оценка риска/ *М.В. Жуковский, И.В. Ярмошенко.* – Екатеринбург: УрО РАН, Институт промышленной экологии. – 1997. – 219 с.
14. Measurement and Calculation of Radon Releases from NORM Residues. Technical Reports Series No. 474 // International Atomic Energy Agency, Vienna. – 2013. – 86 p.
15. *Жуковский М. В.* Радоновая безопасность зданий/ *Жуковский М.В., Кружалов А.В., Гурвич В.Б.* [и др.]. – Екатеринбург: УрО РАН. – 2000. – 180 с.
16. *Sherman M.* Measurement on infiltration using fan pressurization and weather data. LBL–10852 / *M. Sherman, D.T. Grimstrud.* – Lawrence Berkley Laboratory, University of California. – 1980
17. *Sherman M.* The use of blower–door data. LBL–35173/ *M. Sherman.* – Lawrence Berkley Laboratory, University of California. – 1998

18. *Kemski J.* From radon hazard to risk prediction—based on geological maps, soil gas and indoor measurements in Germany / *J. Kemski, R. Klingel, A. Siehl* [и др.] // *Environ. Geol.*, 2009, Vol. 56. – pp. 1269–1279.
19. *Wolfs F.* Measurements of radon—daughter concentrations in and around dwellings in the northern part of the Netherlands; a search for the influences of building materials, construction and ventilation/ *F. Wolfs, H. Hofstede, R.J. Meijler* [и др.] // *Health Physics*. 1984. Vol. 47 No 2. – pp. 271–279.
20. *Ярмошенко И.В.*, Моделирование поступления радона в жилища/ *И.В. Ярмошенко, М.В. Жуковский, А.А. Екидин* // АНРИ, 1999, №4. – с. 17–26.
21. *Miles J.C.H.* Seasonal variation of radon concentrations in UK homes / *J.C.H. Miles, C.B. Howarth, N. Hunter* // *J. Radiol. Prot.* 2012, Vol. 32. P. 275–287.
22. *Гулабянц Л.А.* Противорадоновая защита жилых и общественных зданий: Пособие по проектированию, проект. Часть II./ *Л.А. Гулабянц* // *Жилищное строительство*. 2012. № 3. С. 27–31.
23. *Nezmal M.*, The new method for assessing the radon risk of buiding sites./ *Nezmal M., Matolin M., Barnet I.* [и др.] // *Czech Geological Survey*. – Prague, 2004. – Special Papers No. 16.
24. *Рудаков В.П.* Эманационный мониторинг геосред и процессов / *В.П. Рудаков*. – М.: Научный мир. – 2009. – 176 с.
25. *Микляев П.С.* Радоновое поле Москвы / *П.С. Микляев, В.И. Макаров, А.Л. Дорожко* [и др.] // *Геоэкология*. – 2013. №2. – С. 172–187.
26. *Маренный А.М.* Комплексные мониторинговые исследования формирования радоновых полей грунтовых массивов. Часть 1. Программа и организация исследований / *А.М. Маренный, П.С. Микляев, А.В. Пенезев* [и др.] // АНРИ. – 2014. №4 (79). – С.33–38.
27. *Гулабянц Л.А.* Мощность «активного» слоя грунта при диффузионном переносе радона в грунтовом основании здания / *Л.А. Гулабянц, Б.Ю. Заболотский* // АНРИ. – 2001. № 4. – С. 38–40.
28. *Микляев П.С., Петрова Т.Б., Климишин А.В.* и др. Картирование геогенного радонового потенциала (на примере территории

- Москвы) / П.С. Микляев, Т.Б. Петрова, А.В. Климишин [и др.] // АНРИ. – 2015. № 1 (80). – С. 2–13.
29. *Маренный А.М.* Комплексные мониторинговые исследования формирования радоновых полей грунтовых массивов. Часть 2–характеристики и оборудование экспериментальных площадок / А.М. Маренный, П.С. Микляев, А.В. Пенезев [и др.] // АНРИ. – 2015. №2 (81). – С. 15–26.
30. *Маренный А.М.* Комплексные мониторинговые исследования формирования радоновых полей грунтовых массивов. Часть 4–результаты мониторинга радона внутри грунтовых массивов / А.М. Маренный, П.С. Микляев, А.В. Пенезев [и др.] // АНРИ. – 2015. №3 (82). – С.52–63.
31. *Маренный А.М.* Комплексные мониторинговые исследования формирования радоновых полей грунтовых массивов. Часть 5–результаты лабораторного определения радиационно–физических свойств грунтовых массивов / А.М. Маренный, П.С. Микляев, А.В. Пенезев [и др.] // АНРИ. – 2015. №3 (82). – С. 64–72.
32. *Appleton J.D.* A statistical evaluation of the geogenic controls on indoor radon concentrations and radon risk/ *J.D. Appleton, J.C.H. Miles* // *J. of Environ. Radioactivity.* – 2010. Vol. 101. – P. 799–803.
33. *Scheib C.* Geological controls on radon potential in England / *C. Scheib, J.D. Appleton, J.C.H. Miles* [и др.] // *Proceedings of the Geologists' Association.* – 2013. Vol. 124. – P. 910–928.
34. *Zhukovsky M.* Combination of geological data and radon survey results for radon mapping / *M. Zhukovsky, I. Yarmoshenko, S. Kiselev* // *J. of Environ. Radioactivity.* – 2012. Vol. 112. – P. 1–3.
35. *Gundersen L.C.S.* Geology of radon in the United States / *L.C.S. Gundersen, R.R. Schumann, J.K. Otton* // *Geological Society of America Special Papers.* – 1992. Vol. 271. – P. 1–16.
36. *Miles J C.H.* Mapping variation in radon potential both between and within geological units / *J.D. Appleton, J.C.H. Miles* // *J. of Radiol. Prot.* – 2005. Vol. 25. – P.257–276.
37. *Ielsch G.* Mapping of the geogenic radon potential in France to improve radon risk management: methodology and first application to

- region Bourgogne / *G. Ielsch, M.E. Cushing, Ph. Combes, M. Cuney* // J. of Environ. Radioactivity. – 2010. Vol. 101. – P. 813–820.
38. *Tollefsen T.* From the European indoor radon map towards an atlas of natural radiation / *T. Tollefsen, G. Cinelli, P. Bossew* [и др.] // Radiation Protection Dosimetry (2014). Vol. 162. No. 1–2. P. 129–134.
39. *Gruber V.* The European map of the geogenic radon potential / *V. Gruber, P. Bossew, M. De Cort* [и др.] // J. Radiol. Prot. – 2013. Vol. 33. No 1. – P. 51–60.
40. *Крисюк Э.М.* Методические вопросы организации и проведения радиационного контроля зданий и сооружений / *А.М. Маренный, Э.М. Крисюк, И. В. Павлов* [и др.] // АНРИ. – 1996 / 97. № 3. – С. 31–36.
41. *Павлов И.В.* Задачи и методы радиационного контроля при строительстве зданий / *А.М. Маренный, Л.А. Гулабянц, И.В. Павлов* [и др.] // АНРИ. №3. 2003. С. 2–12.
42. *Маренный А.М.* Задачи и методы оценки потенциальной радоноопасности селитебных территорий / *А.М. Маренный, С.Е. Охрименко, И.В. Павлов* // АНРИ. – 2006. № 2. – С. 25–30.
43. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ–99/2010) // Санитарные правила СП 2.6.1.2612–10. – М., 2010.
44. *Vasilyev A.V.* Low air exchange rate causes high indoor radon concentration in energy-efficient buildings / *A.V. Vasilyev, I.V. Yarmoshenko, M.V. Zhukovsky* // Radiation Protection Dosimetr. – 2015. Vol. 164. No 4. – P. 601–605.
45. *Васильев А.В.* Проблема облучения радоном в современных многоэтажных зданиях / *А.В. Васильев* // Строительство и реконструкция. – 2014. № 4 (54). – С. 37–44.
46. *Yarmoshenko I.* Variance of indoor radon concentration: Major influencing factors / *I. Yarmoshenko, A. Vasilyev, G. Malinovsky* [и др.] // Science of the Total Environ. – 2016 Vol. 541. – P. 155–160.

**Глава 3**  
**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**  
**ЭФФЕКТОВ ОБЛУЧЕНИЯ РАДОНОМ**  
*(М.В. Жуковский, И.В. Яρμοшенко)*

*В 1988 году Международное агентство по исследованию рака отнесло радон к соединениям, классифицируемым как канцероген для человека. В настоящей главе уделено внимание всесторонней оценке результатов эпидемиологических исследований, на основе которых была установлена связь рака легкого с облучением вдыхаемым радоном. Проанализированы эпидемиологические данные, полученные в ходе когортных исследований на шахтерах урановых рудников и методом «случай-контроль» в жилищах. Обсуждены сложности оценок риска рака легкого при облучении радоном, обусловленные неопределенностями в учете значимых параметров эпидемиологических исследований. Рассмотрены модели радиационного риска, которые используются в мировой практике для прогнозирования рака легкого, индуцированного радоном. Результаты эпидемиологических исследований послужили научной основой для разработки современной системы регулирования защиты населения от радона.*

**3.1. Эпидемиологические исследования**  
**последствий облучения радоном**

Эффекты воздействия на организм человека различных веществ и факторов определяются их физическими, химическими и биологическими характеристиками и могут быть исследованы экспериментально с использованием лабораторных животных или в ходе специальных эпидемиологических исследований.

Поскольку радон является инертным веществом, почти весь вдыхаемый газ впоследствии выдыхается. Поэтому радон сам по себе не представляет опасности при объемной активности, характерной для зданий, однако при его радиоактивном распаде образуются твердые радиоактивные продукты, которые присоединяются к аэрозолям и осаждаются в респираторном тракте. Короткоживущие дочерние продукты радона распадаются преимущественно в легком до выведения. Два изотопа из короткоживущих дочерних продуктов  $^{222}\text{Rn}$  –  $^{218}\text{Po}$  и  $^{214}\text{Po}$  – испускают альфа-частицы, энергия которых создает существенную дозу облучения легкого. Для описания морфометрии, механизмов осаждения аэрозолей в респираторном тракте, выведения радиоактивных изотопов из респираторного тракта, расположения подвергающихся риску тканевых мишеней и клеток используется модель респираторного тракта человека [1] с введенными недавно изменениями [2]. Эта модель рассмотрена в Приложении к главе 4.

Первые экспериментальные свидетельства канцерогенности радона дали опыты при облучении лабораторных животных радиоактивным газом [3]. Однако наиболее обоснованные данные о последствиях для здоровья человека были получены в эпидемиологических исследованиях, в ходе которых помимо причинно-следственной связи изучались вид и параметры зависимости доза-эффект.

Рассмотрим более подробно основные принципы изучения последствий воздействия вредных факторов на организм человека, основные результаты эпидемиологических исследований связи облучения радоном и возникновения рака легкого и подходы к прогнозированию риска рака легкого, индуцированного радоном. Для анализа связи между облучением радоном и риском развития рака легкого нашли применение два типа эпидемиологических исследований: когортные и случай-контроль. Кроме того, определенный интерес представляют географически коррелированные (экологические) исследования.

В когортных исследованиях проводится отслеживание случаев заболевания в популяции (когорте), подвергшейся воздействию изучаемого фактора, и сравнение с заболеваемостью в контрольной группе. В качестве контрольной группы может использоваться часть когорты, которая подвергается наименьшим уровням воздействия. Такой подход использовался при изучении заболеваемости раком легко-

го среди шахтеров урановых рудников. По результатам когортного исследования рассчитывается относительный риск,  $RR$ , как отношение рисков возникновения эффекта в основной когорте,  $R$ , и контрольной группе,  $R_0$ :

$$RR = \frac{R}{R_0}, \quad (3.1)$$

Результаты работ по объединенному анализу данных когортных исследований облучения радоном шахтеров представлены в табл. 3.1 в виде оценок дополнительного относительного риска (ДОР,  $ERR = RR - 1$ ) на 100 WLM.

Как видно из табл. 3.1 [4], масштабные исследования, суммирующие большую часть доступной в настоящий момент информации [3, 6 – 8], дают оценки связи кумулятивной экспозиции с риском возникновения рака легкого, находящиеся в хорошем согласии.

*Таблица 3.1.*

**Обобщенные результаты исследований среди шахтеров  
(по материалам Публикации МКРЗ 115 [4])**

Авторы анализа (ссылка)	Кол-во когорт	Кол-во шахтеров	Кол-во чел. лет наблюдения	ДОР на 100 WLM	95% доверительный интервал
ICRP, 1993 [5]	7	31 486	635 022	1,34	0,82 – 2,13
Любин и соавт. 1994 [6]	11	60 570	908 903	0,49	0,20 – 1,00
BEIR VI, 1999 [7]	11	60 705	892 547	0,59	1,32 (станд. ошибка)
НКДАР ООН 2009 [3]	9	125 627	3 115 975	0,59	0,35 – 1,00
Л. Томашек и соавт. [8]	2	10 100	248 782	1,60	1,00 – 2,30

Когортные исследования базируются на индивидуальных данных об облучении, поле, возрасте, времени работы, курении и других характеристиках. Благодаря этому было исследовано влияние различных факторов на параметры зависимости доза-эффект. Объединенные исследования и некоторые из индивидуальных исследований продемонстрировали, что зависимость между экспозицией по радону и раком легкого в той или иной мере модифицируют следующие факторы:

- возраст при облучении,
- продолжительность работы,
- время после облучения,
- достигнутый возраст.

В ряде исследований также наблюдался обратный эффект мощности экспозиции [6, 7], который не обнаруживался при низких уровнях кумулятивной экспозиции [8, 9].

Среди шахтеров также были проведены исследования взаимодействия между облучением радоном и курением при возникновении рака легкого. Анализ, проведенный в докладе BEIR VI, продемонстрировал субмультипликативный эффект взаимодействия между экспозицией по радону и курением [7]. Когда статус по курению известен, оцененный ДОР незначительно больше среди некурящих, чем среди курящих [6, 10].

В целом результаты когортных исследований облучения радоном шахтеров демонстрируют статистически значимую связь между кумулятивной радоновой экспозицией и смертностью от рака легкого при уровнях экспозиции от 50 WLM [4]. Такая экспозиция шахтеров соответствует продолжительной экспозиции в жилищах при среднегодовой объемной активности радона около 200 Бк/м<sup>3</sup>. Говоря об эпидемиологических исследованиях когорт шахтеров, необходимо отметить, что одним из важных результатов этих исследований было заключение о том, что рак легкого является единственным существенным стохастическим эффектом облучения радоном и его дочерними продуктами.

Уже на основании результатов первых эпидемиологических исследований шахтеров и экспериментов над лабораторными животными

ми в 1986 г. Всемирная организация здравоохранения признала радон причиной возникновения рака легкого [4, 5, 11, 12].

Однако долгое время не было твердой уверенности в применимости исследований облучения радоном в шахтах для оценки риска рака легкого, индуцированного радоном, при объемной активности радона, характерной для жилищ [4]. Эпидемиологические данные, полученные для шахтеров, имели следующие ограничения для оценки радиационного риска для населения:

- когорты шахтеров состояли из лиц мужского пола среднего и старшего возраста;
- доля курящих среди шахтеров значительно превышала средний популяционный уровень;
- ЭРОА радона в шахтах, как правило, многократно превышала уровни, характерные для жилищ;
- интенсивность дыхания при работе в шахте выше, чем при нахождении в жилище;
- в результате высокой запыленности атмосферы шахт дисперсный состав ДПР радона в шахтах существенно отличается;
- в атмосфере шахт могут находиться другие канцерогены: пыль, в том числе содержащая долгоживущие природные радионуклиды, дизельные выхлопы, мышьяк и др.

В связи с этим возникла необходимость проведения эпидемиологических исследований связи рака легкого с облучением в жилищах. Для проведения работ в этом направлении наиболее подходящей оказалась методика эпидемиологического исследования случай-контроль.

В исследовании случай-контроль в основную группу включаются лица с исследуемым заболеванием (например, с диагнозом рак легкого), а в контрольную группу – лица, у которых этого заболевания нет. Проводится анализ наличия и интенсивности изучаемого фактора воздействия в прошлом каждого индивидуума, и рассчитываются шансы членов контрольной и основной группы быть под воздействием изучаемого фактора в прошлом. Связь фактора воздействия и заболевания характеризуется отношением шансов (шанс соответствует частоте возникновения эффекта):

$$OR = \frac{A/C}{B/D}, \quad (3.2)$$

где  $A$  – число членов основной группы, подвергшихся воздействию;  $B$  – число членов основной группы, не подвергшихся воздействию;  $C$  – число членов контрольной группы, подвергшихся воздействию;  $D$  – число членов контрольной группы, не подвергшихся воздействию.

Для анализа типа и параметров зависимости доза-эффект основная группа может быть дополнительно разбита на подгруппы в зависимости от интенсивности изучаемого фактора воздействия (экспозиции, дозы облучения и т. п.).

Обоснование критериев, положенных в основу создания контрольной группы, – одна из основных проблем эпидемиологических исследований. Для корректного решения задачи поиска зависимости доза-эффект в случае облучения радоном контрольная группа должна формироваться с учетом других факторов риска рака легкого. В первую очередь к таким факторам относятся курение, достигнутый возраст и пол.

За последние 30 лет в мире было проведено не менее 40 исследований случай-контроль связи между облучением радоном в жилищах и заболеваемостью раком легкого [13], из них более двадцати крупных, с объемом основной группы не менее 200 человек. Наиболее полный обзор эпидемиологических исследований риска развития рака легкого при облучении радоном в жилищах представлен в Докладе НКДАР ООН [3] и 115 Публикации МКРЗ [4]. Обобщенно результаты этих исследований представлены на рис. 3.1.

В основную группу были включены лица с диагнозом рак легкого. Как правило, контрольная группа формировалась с учетом пола и возраста членов основной группы. В некоторых исследованиях группы были составлены только из курящих или некурящих.

После формирования основной и контрольной групп на каждого участника исследования собиралась информация о местах проживания в прошлом, данные о курении и других факторах, которые могут влиять на индивидуальный риск развития рака легкого. В жилищах участников были проведены измерения объемной активности

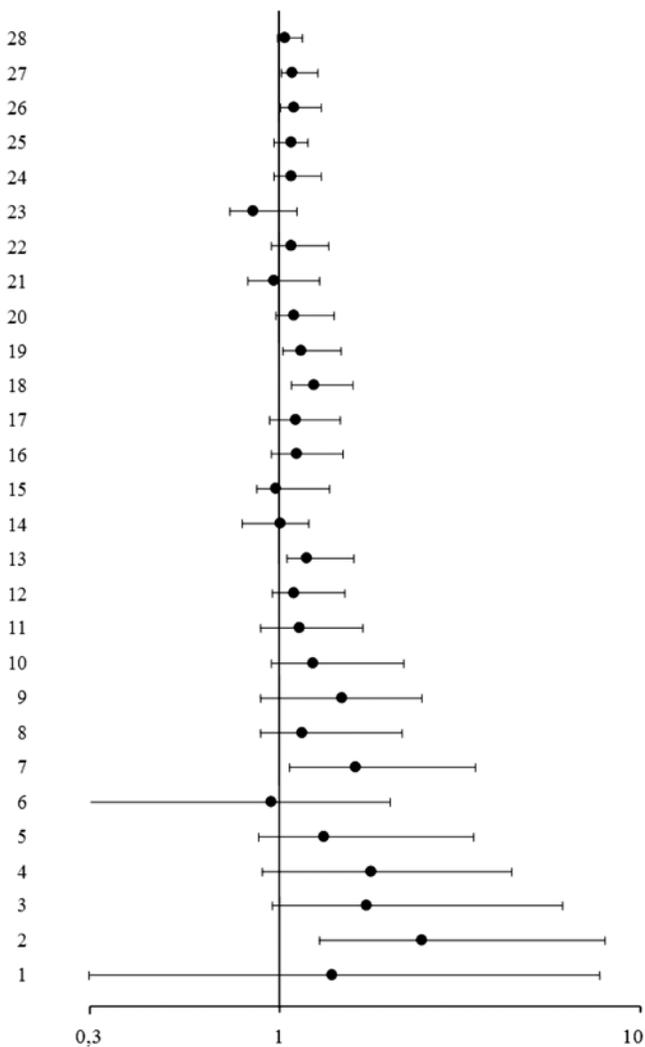
радона. В большинстве исследований использовались интегральные трековые детекторы альфа-частиц. Во многих исследованиях измерения проводились в нескольких жилищах, в которых проживали лица из основной и контрольной групп, для более полной оценки экспозиции за период, предшествовавший заболеванию или включению в контрольную группу. В некоторых исследованиях применялись ретроспективные методы измерения.

По результатам проведенных измерений оценивалась индивидуальная экспозиция за период времени, для которого удалось установить историю проживания и провести необходимые измерения. Экспозицию в этом случае удобно представлять в виде средней объемной активности радона за определенный период времени. Период времени, для которого восстановлена экспозиция, таким образом, является важной характеристикой исследования.

После определения индивидуальной экспозиции проводилось сравнение распределения уровней облучения в основной и контрольной группах и рассчитывались отношения шансов. В случаях, когда основная и контрольная группы формировались без учета курения, применялись специальные методы статистической обработки данных и рассчитывалось скорректированное по курению значение отношения шансов.

При относительно невысокой объемной активности радона, характерной для жилищ, следует ожидать, что дополнительный риск рака легкого также является небольшим. Поэтому, чтобы выявить риск, связанный с радоном, на фоне влияния других факторов и с учетом стохастического характера канцерогенеза, необходимы очень большие, порядка 10 000 человек, группы для исследования. На практике сформировать и исследовать столь многочисленные группы больных раком легкого в рамках эпидемиологического исследования одной территории невозможно. Поэтому ни одно из проведенных исследований случай-контроль не обладало достаточной статистической мощностью, чтобы делать заключения о наличии и величине эффекта от воздействия радона.

Результаты отдельных эпидемиологических исследований, каждое из которых не обладает достаточной статистической мощ-

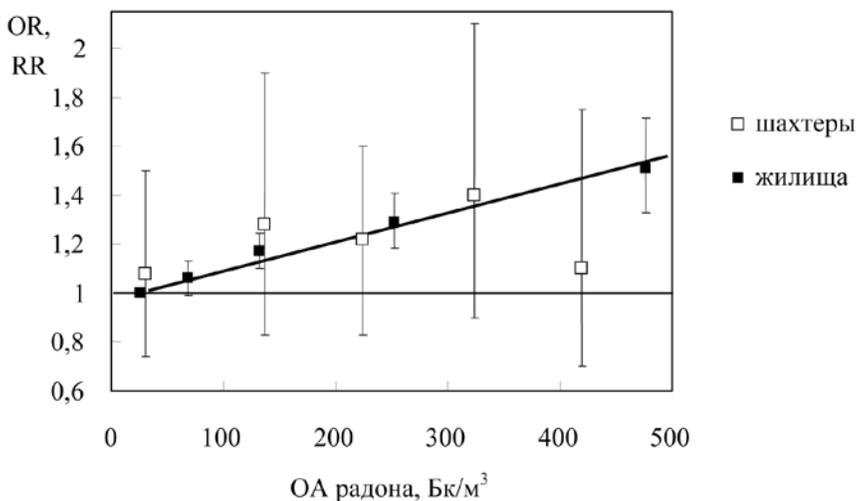


**Рис. 3.1.** Результаты оценки относительного риска рака легкого (при объемной активности радона  $100 \text{ Бк/м}^3$ , с 95% доверительным интервалом) по данным 30 исследований случай контроль, приведенным в обзорах НКДАР ООН [3] и МКРЗ [4]. (Место проведения исследо-

вания и год публикации результатов: 1 – Трентино, Италия, 2001; 2 – Испания, 2002; 3 – Швеция (ретроспект. измерения), 2002; 4 – Финляндия, 1996; 5 – Швеция, 2002; 6 – Шеньян, Китай, 1990; 7 – Миссури, США (ретроспект. измерения), 1999; 8 – Стокгольм, Швеция, 1992; 9 – Нью Джерси, США, 1990; 10 – Айова, США, 2000; 11 – Лацио, Италия, 2005; 12 – Швеция, некур., 2001; 13 – Ганьсу, Китай, 2002; 14 – США, 3 штата, 1999; 15 – Виннипег, Канада, 1994; 16 – Великобритания, юго-западная часть, 1998; 17 – Финляндия, 1996; 18 – Тироль, Австрия, 2002; 19 – Швеция, 1997; 20 – Германия, 2004; 21 – Западная Германия, 2001; 22 – Миссури, США, 1994; 23 – Миссури, США, 1999; 24 – Восточная Германия (1 год), 2003; 25 – Восточная Германия (6 мес.), 2003; 26 – Швеция, 1994; 27 – Чехия, 2001; 28 – Франция, 2004).

ностью, можно использовать для обобщенного анализа. Различают два типа такого анализа: мета-анализ и объединенный анализ первичных данных.

В 1990-е и 2000-е гг. было проведено несколько достаточно информативных мета-анализов радоновых исследований [3, 7, 14]. Развернутый мета-анализ большого числа исследований случай-контроль связи рака легкого с облучением радоном в жилищах был представлен в работе [15]. Суммарный объем основной группы составил 12 044, контрольной – 20 932 человека. По результатам этого исследования проживание в жилище при объемной активности радона  $100 \text{ Бк/м}^3$  приводит к увеличению вероятности заболевания раком легкого на 12% (95% доверительный интервал 7–17%). В диапазоне объемной активности радона более  $100 \text{ Бк/м}^3$  отношение шансов статистически достоверно больше единицы, а зависимость доза-эффект хорошо описывается линейной зависимостью. С учетом среднего периода 20 лет, для которого проведена оценка экспозиции в жилище, полученное значение относительного риска находится в хорошем согласии с результатами, полученными на основании анализа данных по эпидемиологии шахтеров в совпадающем диапазоне экспозиции в шахтах (рис. 3.2).



**Рис. 3.2.** Сравнение результатов мета-анализа исследований случай-контроль в жилищах и объединенного анализа когортных исследований шахтеров в диапазоне сопоставимых экспозиций

Мета-анализ позволяет достаточно оперативно обобщить результаты нескольких эпидемиологических исследований, однако этот подход имеет ряд недостатков, связанных с невозможностью индивидуального учета различных влияющих факторов, в случае радона это в первую очередь курение. Кроме того, в мета-анализе используются неоднородные результаты исследований, проведенных с использованием различных методологических подходов.

Избежать этих недостатков можно при объединенном анализе первичных эпидемиологических данных, включающем интегрирование исходных персональных данных и единую стандартную методологию проведения статистического анализа. В середине 2000-х гг. было проведено три анализа, в которых рассматривались объединенные данные 13 европейских [16], 7 североамериканских [17] и 2 китайских [18] исследований случай-контроль.

Рассмотрим подробнее наиболее масштабное исследование – объединенный анализ европейских данных, проведенный под руководством известного статистика-эпидемиолога Сары Дарби [16].

В этот анализ были включены все исследования случай-контроль, проведенные в европейских странах и удовлетворяющие следующим условиям:

- основная и контрольная группы исследования включают не менее 150 членов, отобранных из одной популяции;
- на каждого участника исследования собраны детальные данные о курении;
- измерения объемной активности радона проведены во всех жилищах, в которых участник исследования проживал предшествующие 15 лет как минимум.

Всего в европейском объединенном анализе были использованы данные о 7 148 лицах с диагнозом рак легкого и 14 208 без такого диагноза. Экспозиция по радону рассчитывалась за период от 5 до 35 лет до постановки диагноза члену основной группы или до даты получения данных о члене контрольной группы. Пятилетний интервал времени от индукции рака легкого до его диагностирования, который был установлен по данным исследований шахтеров, не учитывался при оценке экспозиции. В среднем данные об объемной активности радона были доступны для периода 23 года. В случае отсутствия данных измерений в жилище в какой-то из промежутков времени в пределах 35 лет использовалось среднее значение объемной активности радона в жилищах контрольной группы соответствующего региона. В качестве меры экспозиции в данном исследовании использовалась средняя объемная активность радона за период 5–35 лет до участия в исследовании.

По результатам анализа объединенных данных были получены следующие результаты:

- риск рака легкого увеличивается на 8% (95% доверительный интервал 3–16%) при увеличении объемной активности радона на 100 Бк/м<sup>3</sup>;
- зависимость относительного риска от экспозиции близка к линейной;
- отсутствуют свидетельства существования порога зависимости доза-эффект, т.е. уровня экспозиции, ниже которого негативный эффект отсутствует, и доказано, что такой по-

рог, если существует, не может находиться в диапазоне объемной активности выше 150 Бк/м<sup>3</sup>;

- статистически значимый риск рака легкого наблюдается при ограничении анализа данными, относящимися к диапазонам объемной активности радона 0–200, а также 100–199 Бк/м<sup>3</sup>;
- риск рака легкого для некурящих на протяжении всей жизни увеличивается на 11% на 100 Бк/м<sup>3</sup> (95% доверительный интервал 0–28%).

Одним из источников неопределенности при оценке суммарной экспозиции за большой промежуток времени на основании измерений только в один год является вариация среднегодовой объемной активности радона. Как известно, ошибки определения экспозиции в эпидемиологическом исследовании приводят к занижению оценки относительного риска, а в крайнем случае, когда рассчитанная экспозиция полностью не соответствует реальной, оценка дополнительного относительного риска равна нулю. Авторы объединенного анализа учли этот эффект и получили скорректированное значение дополнительного относительного риска рака легкого, равное 16 % на 100 Бк/м<sup>3</sup> (95% доверительный интервал 5–31 %). Эта величина существенно не зависит от пола, возраста и курения, что свидетельствует о мультипликативном характере взаимодействия ингаляционного облучения ДПР радона и спонтанной частоты возникновения рака легкого.

Основные результаты работ по объединенному анализу североамериканских и китайских объединенных исследований случай-контроль связи между раком легкого и объемной активности радона представлены в табл. 3.2. Оценки увеличения заболеваемости раком легкого на единицу экспозиции в трех объединенных исследованиях очень близки друг другу и статистически не различаются. Обобщенная оценка относительного риска по результатам европейского, североамериканского и китайского исследований составляет 1,09 на 100 Бк/м<sup>3</sup> [3]. При ограничении анализа случаями, когда получены более точные оценки индивидуальной экспозиции, значение относительного риска составило 1,11.

В рамках Международного радонового проекта ВОЗ [13] Сара Дарби представила предварительные данные объединенного анализа, включающего в себя данные практически по всем радоновым исследованиям случай-контроль, выполненным в мире. В число работ, включенных в этот анализ, вошли и два эпидемиологических исследования, выполненные в Институте промышленной экологии УрО РАН на Среднем Урале [19]. Рассматриваемый в объединенном мировом исследовании объем основной группы составил 15 530, а контрольной – 22 884 человека. В целом полученные данные соответствуют результатам, приведенным в табл. 3.2, и демонстрируют статистически достоверный канцерогенный эффект воздействия радона при уровнях объемной активности радона в жилищах, не превышающих 50–100 Бк/м<sup>3</sup> [4].

Таблица 3.2.

**Результаты объединенного анализа исследований случай-контроль облучения радоном в жилищах и рака легкого**

Объединенный анализ	Суммарный объем основной / контрольной группы	Относительный риск при объемной активности радона 100 Бк/м <sup>3</sup> (с 95% доверительным интервалом)		
		по всем исходным данным	по данным для проживавших только по 1 или 2 адресам	с учетом поправки на неопределенность измерений
Европа [16]	7148/14208	0,084 (0,030–0,158)	0,094 (0,034–0,175)	0,16 (0,05–0,31)
Северная Америка [17]	3662/4966	0,11 (0,00–0,28)	0,18 (0,02–0,43)	—
Китай [18]	1050/1995	0,133 (0,01–0,36)	0,319 (0,07–0,91)	—

Таким образом, проведенные за последние десятилетия эпидемиологические исследования убедительно показали, что повышенный риск возникновения радиационно-индуцированного рака легкого существует при относительно небольших уровнях объемной активности радона, характерных для жилищ. Был подтвержден мультипликативный характер взаимодействия ингаляционного облучения ДПР радона и спонтанной частоты возникновения рака легкого.

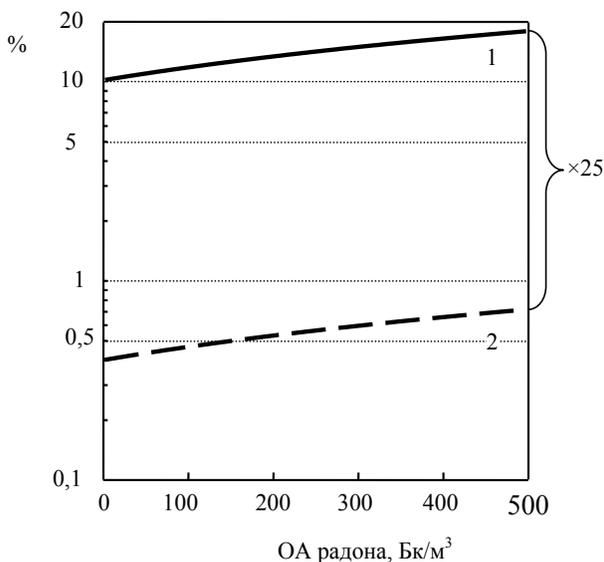
Одним из преимуществ метода объединенного анализа первичных эпидемиологических данных является возможность рассмотреть индивидуальную информацию о курении, собранную на основе прямых опросов, и учесть фактор курения при оценке риска рака легкого, связанного с радоном. В европейском исследовании [16] при стратификации по исследованию, региону, возрасту и полу, но не по курению относительный риск рака легкого на 100 Бк/м<sup>3</sup> составил 1,02. Оценка увеличилась до 1,05 после дополнительной стратификации по курению с использованием семи категорий (никогда не курившие; курящие в настоящее время < 15, 15-24 или >25 сигарет в день; бросившие курить <10 или <10 лет назад; неизвестно). Дальнейшее увеличение до 1,08 получено после дополнительной стратификации курящих по возрасту начала курения и бросивших курить по интенсивности курения в прошлом.

Статистически значимый положительный тренд зависимости доза-эффект наблюдался в европейском объединенном исследовании, когда анализ был ограничен не курившими на протяжении всей жизни – 268 мужчинами и 616 женщинами в основной группе и более чем 5 тыс. членов контрольной группы [16]. Величина кумулятивного риска рака легкого к возрасту 75 лет, рассчитанная для не куривших на протяжении всей жизни, составляет 0,4, 0,5 и 0,7% при объемной активности радона 0 (теоретическая ситуация без облучения), 100 и 400 Бк/м<sup>3</sup> соответственно. Базовый риск рака легкого постоянных курильщиков значительно, примерно в 25 раз, выше, чем у не куривших. Для этой группы пожизненный кумулятивный риск рака легкого к возрасту 75 лет составляет около 10, 12 и 16% для объемной активности радона 0, 100 и 400 Бк/м<sup>3</sup> соответственно [16].

Приведенные в предыдущем параграфе величины позволяют проводить приблизительную оценку риска злокачественных новообразований легкого, связанных с облучением радоном. На рис. 3.3 показан относительный вклад различных причин в смертность от рака легкого к возрасту 75 лет в условной популяции, которая состоит наполовину из постоянно курящих и наполовину из никогда не куривших. Расчет проведен для объемной активности радона 100 Бк/м<sup>3</sup>. Основная причина развития рака легкого в современном обществе – курение, что отражает рис. 3.3. Радон и дочерние продукты, без учета совместного с курением эффекта, ответственны в современной популяции за незначительную часть заболеваемости и смертности. Основная часть риска, связанного с радоном, реализуется в результате совместного действия радона и курения. На рис. 3.4 показана зависимость риска рака легкого к возрасту 75 лет от объемной активности радона для курящих и некурящих. Зависимости на рис. 3.4, параллельные в логарифмическом масштабе, отражают мультипликативную модель риска рака легкого. Увеличение риска рака легкого в 25 раз соответствует достаточно интенсивному курению. В работе [20] рассмотрены варианты расчета риска рака легкого в ситуациях менее интенсивного курения и для экс-курильщиков. Для бросивших курить в возрасте 50 лет риска рака легкого снижался в два раза.



**Рис. 3.3.** Вклад, %, различных причин в смертность от рака легкого к возрасту 75 лет. Популяция: 50% курит, 50% никогда не курили. Объемная активность радона: 100 Бк/м<sup>3</sup>



**Рис. 3.4.** Риск рака легкого к возрасту 75 лет в зависимости от объемной активности радона для курильщиков (1) и некурильщиков (2). Риск при объемной активности радона=0 для никогда не куривших принят равным 0,4 % [4]

Еще один тип эпидемиологического исследования, который следует упомянуть в контексте изучения последствий облучения радоном для здоровья человека, – это географически коррелированные исследования. В ходе таких исследований сопоставляется средний уровень облучения населения и средняя заболеваемость или смертность от рака легкого на территории. К настоящему времени в мире проведено не менее 15 географически коррелированных исследований [21]. Однако наибольшую известность получил анализ, проведенный американским ученым Бернардом Коэном, основанный на данных большого количества измерений объемной активности радона (примерно 275 000 измерений).

Б. Коэн исследовал корреляцию между средней объемной активностью радона и средней смертностью от рака легкого в более чем 1600 округах США [22–27] и обнаружил статистически значимую

отрицательную зависимость. На основании полученных результатов автор исследования поставил под сомнение линейную беспороговую зависимость между радоном и раком легкого. Этот результат привлек внимание специалистов ввиду коренного противоречия с базовой концепцией доза-эффект, положенной в основу современной системы радиационной безопасности. В дискуссии, развернувшейся в научной литературе, в первую очередь обсуждались методические вопросы, связанные с учетом курения и других факторов в таком типе исследований [28–30]. Обращалось внимание, что курение является конфаундером, то есть фактором, который одновременно имеет причинную связь с рассматриваемым эффектом и статистическую связь с изучаемым воздействием. В своей публикации Международное агентство по исследованию рака отмечает, что в тех исследованиях, в которых соблюдались строгие методические требования и были проанализированы индивидуальные данные о курении и других потенциальных конфаундерах, отрицательный тренд зависимости доза-эффект не наблюдался [31]. Итогом достаточно бурного обсуждения стало решение авторитетных международных организаций, деятельность которых связана с радиационной безопасностью, не принимать во внимание результаты географически коррелированных исследований при оценке последствий облучения радоном и разработке соответствующих моделей [4, 31].

### **3.2. Модели радиационного риска, основанные на эпидемиологических данных**

Данные о виде и параметрах зависимости доза-эффект, полученные в эпидемиологических исследованиях, используются для прогнозирования риска негативных последствий для здоровья человека в результате воздействия вредных веществ и факторов. Несмотря на то, что эпидемиологические данные дают прямые оценки риска последствий в изучаемой группе, эти оценки не могут быть применены непосредственно к популяциям с другими половозрастными характеристиками. В этом случае для проведения необходимых оценок применяются модели риска.

Эффект облучения зависит от дозы. При описании последствий облучения радоном в жилищах для здоровья человека можно ограничиться стохастическими эффектами и в первую очередь возникновением онкологических заболеваний. Ситуации облучения населения в дозах, соответствующих возникновению тканевых реакций (детерминированных эффектов), не столь распространены, как облучение в малых дозах.

Методы оценки радиационных рисков как при общем облучении человека, так и при облучении дочерними продуктами распада радона достаточно подробно описаны в публикациях МКРЗ, докладах Комиссии по биологическим эффектам ионизирующей радиации Национальной Академии наук США и НКДАР ООН [1, 3–5, 7, 33–35, 37]. Вкратце рассмотрим основные модели расчета рисков, использованные в данной работе.

Пусть  $\lambda_0(t)$  – спонтанная онкологическая заболеваемость какой-либо определенной локализации в возрасте  $t$ , в конкретной необлученной популяции (базовая частота). Тогда общая заболеваемость с учетом облучения будет выражаться следующим образом:

$$\lambda_r(t_e, t, D) = \lambda_0(t) + \lambda_r(t, t_e, D), \quad (3.3)$$

где  $\lambda_r(t, t_e, D)$  – избыточная заболеваемость в определенном возрасте  $t$ , связанная с облучением данного органа дозой  $D$  в возрасте  $t_e$ .

Существуют две основные модели экстраполяции риска [5, 36]:

- модель абсолютного риска (аддитивная);
- модель относительного риска (мультипликативная).

Согласно первой модели дополнительная частота возникновения радиационно-индуцированного рака не зависит от базовой (спонтанной) частоты заболевания. В соответствии со второй моделью облучение вызывает увеличение вероятности заболевания, пропорциональное базовой частоте. Следует учитывать, что риск онкологической заболеваемости проявляется после некоторого латентного периода  $\tau$ , изменяющегося от 2 лет для лейкемии до 10 лет для большинства солидных опухолей.

Для модели абсолютного риска ожидаемая частота возникновения радиационно-индуцированных онкологических заболеваний может быть представлена в виде:

$$\lambda_r(t_e, t, D) = f(D) \cdot g_{m,t}(t_e, t), \quad (3.4)$$

где  $f(D)$  – линейная или линейно-квадратичная функция от поглощенной дозы  $D$  в органе (с учетом относительной биологической эффективности);  $g_{m,t}(t_e, t)$  – функция, зависящая от возраста на момент облучения  $t_e$ , возраста  $t$  на момент оценки риска и пола человека ( $m$  – мужчины,  $f$  – женщины).

Для модели относительного риска частота возникновения радиационно-индуцированных онкологических заболеваний имеет вид

$$\lambda_r(t_e, t, D) = \lambda_0 \cdot f(D) \cdot g_{m,t}(t_e, t), \quad (3.5)$$

где  $\lambda_0(t)$  – спонтанная онкологическая заболеваемость (базовая частота) какой-либо определенной локализации в возрасте  $t$ . В принципе функция  $f(D)$  зависит как от дозы, так и от мощности дозы, при которой происходило облучение.

Значение функции  $g_{m,t}(t_e, t)$  для любой из моделей экстраполяции риска, как правило, зависит от возраста на момент облучения – более молодой организм имеет большую радиационную чувствительность. В зависимости от вида органа или ткани, подвергшейся облучению, эта функция может иметь постоянное значение для  $t \geq t_e + \tau$  (модели постоянного абсолютного или относительного риска) или изменяться (в основном уменьшаться) по мере увеличения времени, прошедшего с момента облучения.

Расчет риска возникновения рака легких, обусловленного ингаляцией короткоживущих дочерних продуктов распада радона, имеет ряд своих специфических особенностей. Основные из них:

- использование преимущественно мультипликативных моделей экстраполяции риска;
- пролонгированный характер радиационного воздействия;
- изменение значений коэффициентов относительного риска со временем, прошедшим с момента радиационного воздействия.

При оценке радиационного риска, связанного с облучением радоном вместо дозы облучения часто используется экспозиция по радону или ДПР радона, которой подвергается человек. Под экспозицией  $P$  за период времени воздействия  $T$  понимают следующее выражение:

$$P = \int_0^T C_{Rn}(t)dt = \overline{C_{Rn}} \cdot T, \quad (3.6)$$

где  $C_{Rn}(t)$  – изменяющееся со временем значение объемной активности радона,  $\overline{C_{Rn}}$  – среднее значение объемной активности радона за период времени воздействия  $T$ . Величина  $C_{Rn}(t)$  может быть определена при помощи радон-мониторов, непрерывно фиксирующих изменение объемной активности радона в воздухе. Для оценки непосредственно величины  $\overline{C_{Rn}}$  можно использовать интегрирующие средства измерения объемной активности радона.

Одной из особенностей использования основных моделей оценки радиационных рисков при облучении ДПР радона является то, что традиционно все коэффициенты риска нормированы на экспозицию по дочерним продуктам распада радона, выраженную в единицах WLM. Это обусловлено тем, что основными исходными данными при построении данных моделей являлись эпидемиологические данные по заболеваемости раком легкого в когортах шахтеров урановых рудников, для которых облучение радоном оценивалось в данных внесистемных единицах. В связи с этим измеренные значения среднегодовой экспозиции  $P$  (Бк·ч/м<sup>3</sup>) должны быть пересчитаны в величину экспозиции, выраженной в единицах WLM.

Результаты эпидемиологических когортных исследований шахтеров позволили построить ряд моделей радиационного риска, которые учитывают пол человека, а также различные временные факторы, оказывающие влияние на индицирование рака легкого при облучении радоном.

*Модель постоянного риска.* Для модели постоянного относительного риска основным является предположение о том, что коэффициент дополнительного относительного риска в возрасте

$t$  ( $K_{ERR}(t)$ ) зависит только от экспозиции по ДПП радона ( $P_{WLM}(t_e)$ ), полученной в возрасте  $t_e$ , и не зависит от остальных факторов (МКРЗ, 1992)

$$K_{ERR}(t) = 0,0083 \cdot P_{WLM}(t_e), \text{ для } t > t_e + \tau, \quad (3.7)$$

где  $P_{WLM}(t_e)$  – годовая экспозиция по ДПП радона, полученная в возрасте  $t_e$  и выраженная в единицах WLM,  $\tau$  – латентный период, равный пяти годам. Коэффициент дополнительного относительного риска, обусловленный кумулятивной экспозицией ДПП радона за весь период жизни или за определенный период (производственная деятельность), может быть рассчитан как

$$K_{ERR}(t) = 0,0083 \int_0^{t-\tau} \dot{P}_{WLM}(t_e) dt_e, \quad (3.8)$$

где  $\dot{P}_{WLM}(t_e)$  – мощность экспозиции по ДПП радона в возрасте  $t_e$ , или, при замене интегрирования суммированием,

$$K_{ERR}(t) = 0,0083 \sum_{t_e=0}^{t-\tau} \dot{P}_{WLM}(t_e), \quad (3.9)$$

*Модель BEIR IV.* Модель, предложенная Комиссией BEIR IV [38], большей частью основывается на анализе данных по раку легких у шахтеров Канады и США. Это модифицированная мультипликативная модель, учитывающая как время, прошедшее с момента экспозиции, так и достигнутый возраст. Окончательная рекомендованная модель дается соотношением:

$$K_{ERR}(t) = s\gamma(t) [P_1 + 0,5P_2], \quad (3.10)$$

где  $\gamma(t) = 1,2$  для  $t < 55$  лет;  $\gamma(t) = 1,0$  для  $55 \leq t \leq 64$  года;  $\gamma(t) = 0,4$  для  $t > 65$  лет и  $s$  – коэффициент пропорциональности с экспозицией, принятый в оригинальной модели BEIR IV равным 0,025;  $P_1$  – экспозиция по потенциальной энергии (в WLM), полученная в интервале между 5 и 15 годами перед достижением возраста  $t$ ;  $P_2$  – экспозиция (WLM), полученная за 15 лет и более до этого возраста.

Таким образом, данная модель приводит к ступенчатому изменению дополнительной частоты возникновения заболеваний раком

легких. При использовании данной модели необходимо помнить, что в отличие от модели постоянного риска и рассматриваемой ниже модели GSF, где рассчитываются риск от однократной экспозиции, мы получаем значение риска возникновения радиационно-индуцированного рака легких от кумулятивной (суммарной) экспозиции за весь период воздействия.

*Модель GSF или модель Якоби.* В отличие от модели постоянного риска в модели GSF (МКРЗ, 1995) учитывается, что коэффициент дополнительного относительного риска,  $K_{ERR}(t)$ , зависит от времени, прошедшего с момента воздействия ДПР радона и возраста на момент облучения. Для однократного воздействия ДПР радона в возрасте  $t_e$  с экспозицией  $P_{WLM}(t_e)$ :

$$K_{ERR}(t, t_e) = P_{WLM}(t_e) \cdot s(t_e) \cdot \phi(t - t_e), \quad (3.11)$$

где  $s(t_e)$  – коэффициент пропорциональности, учитывающий уменьшающуюся канцерогенную восприимчивость легких с увеличением возраста облучения:

$$s(t) = \begin{cases} 0,036 & \text{для } t_e < 25 \\ 0,032 & \text{для } 25 \leq t_e < 30 \\ 0,030 & \text{для } 30 \leq t_e < 35 \\ 0,0285 & \text{для } 35 \leq t_e < 40 \\ 0,027 & \text{для } 40 \leq t_e < 45 \\ 0,0255 & \text{для } 45 \leq t_e < 50 \\ 0,024 & \text{для } 50 \leq t_e < 55 \\ 0,018 & \text{для } t_e \geq 55 . \end{cases} \quad (3.12)$$

Функция  $\phi(t-t_e)$  характеризует распределение относительной латентности и нормирована на единицу в максимуме. Вслед за этим максимумом предполагается уменьшение дополнительной относительной частоты заболеваний с периодом двукратного уменьшения, равным 10 годам:

$$\phi(t-t_e) = \begin{cases} 0 & \text{для } t-t_e \leq 4 \\ 0,25 \cdot (t-t_e-4) & \text{для } 4 < t-t_e \leq 8 \\ 1 & \text{для } 8 < t-t_e \leq 12 \\ \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot (t-t_e-12)}{10}\right) & \text{для } t-t_e > 12 \end{cases} \quad (3.13)$$

Коэффициент дополнительного относительного риска, обусловленный кумулятивной экспозицией ДПР радона за весь период, начиная с начала жизни, при условии малости рисков может быть рассчитан как

$$K_{ERR}(t) \approx \sum_{t_e=0}^{t-\tau} K_{ERR}(t, t_e). \quad (3.14)$$

*Модель BEIR VI.* Данная модель [7] учитывает максимальное количество факторов, оказывающих влияние на процессы возникновения радиационно-индуцированного рака легких. Можно выделить два основных отличия от рассмотренных ранее моделей. Во-первых, модель BEIR VI прогнозирует уменьшение относительного риска на единицу экспозиции при увеличении мощности эквивалентной дозы на легочную ткань, т. е. увеличении ЭРОА радона в процессе облучения (обратная зависимость от мощности дозы). Во-вторых, в этой модели используются различные значения дополнительного относительного риска для курящих и некурящих, которые соответствуют субмультипликативному взаимодействию между курением и облучением ДПР радона.

В зависимости от исходных параметров эта модель имеет два варианта:

*вариант 1* – относительный риск зависит от времени, прошедшего с момента облучения, достигнутого возраста и длительности облучения (модель TSE/AGE/DUR);

*вариант 2* – относительный риск зависит от времени, прошедшего с момента облучения, достигнутого возраста и уровня ЭРОА радона в процессе облучения (модель TSE/AGE/WL).

Общий вид модели относительного риска возникновения рака легких, вызванного облучением ДПР радона, может быть представлен выражением:

$$K_{ERR}(t) = \beta (P_{5-14} + \theta_{14-24} P_{15-24} + \theta_{25+} P_{25+}) \cdot \phi(t) \cdot \gamma(z), \quad (3.15)$$

где  $\beta$  – коэффициент пропорциональности (в WLM<sup>-1</sup>);  $P_{5-14}$ ,  $P_{15-24}$ ,  $P_{25+}$  – кумулятивная экспозиция по потенциальной энергии (выраженная в единицах WLM) полученная в интервалах времени от 5 до 14 лет, от 15 до 24 лет и 25 лет и более до возраста  $t$ , для которого производится оценка риска;  $\theta_{14-24}$ ,  $\theta_{25+}$  – коэффициенты, представляющие относительный вклад в общий риск возникновения рака легких, обусловленный облучением в интервалах времени от 15 до 24 лет, 25 лет и более;  $\phi(t)$  – функция пропорциональности, учитывающая уменьшение канцерогенной восприимчивости легких с увеличением достигнутого возраста  $t$ ;  $\gamma(z)$  – функция, зависящая от длительности облучения  $z$  (в годах) или от уровня объемной активности ДПР радона, выраженной в единицах рабочего уровня WL (1 WL соответствует ЭРОА радона 3700 Бк/м<sup>3</sup>).

Параметры модели экстраполяции риска модели BEIR-VI представлены в табл. 3.3.

*Модель «Висмут».* Эта модель имеет вид, аналогичный модели BEIR VI, т. е. также представляется уравнением (3.15), но с другими значениями параметров (см. табл. 3.4).

Модель разработана по результатам эпидемиологических исследований, проведенных с 1946 по 1990 г. в когорте из 59 001 мужчин, рабочих урановых рудников компании «Висмут» в ГДР [39]. Среди них было выявлено 2 388 смертей от рака легких. Особенность этих эпидемиологических исследований состоит в том, что общее количество людей в когорте примерно равно общему количеству в 11 разных когортах эпидемиологических исследований, которые легли в основу модели BEIR VI. Кроме того, и это особенно привлекает внимание к данной работе, все горнорабочие немецкой когорты были из одного географического региона с одинаковыми социальными условиями жизни, и проведение исследований, включая оценку экспозиции по ДПР радона, проводились по одним и тем же процедурам. Эти обстоя-

Таблица 3.3.

**Параметры модели экстраполяции риска BEIR VI**

Вариант 1 (модель TSE/AGE/DUR)		Вариант 2 (модель TSE/AGE/WL)	
Параметр	Значение	Параметр	Значение
$\beta$	0,0050; 0,011 <sup>*</sup> (0,0055)	$\beta$	0,069; 0,153 <sup>*</sup> (0,0768)
$\theta_{5-14}$	1,00	$\theta_{5-14}$	1,00
$\theta_{15-24}$	0,72	$\theta_{15-24}$	0,78
$\theta_{25+}$	0,44	$\theta_{25+}$	0,51
$\varphi(<55)$	1,00	$\varphi(<55)$	1,00
$\varphi(55-64)$	0,52	$\varphi(55-64)$	0,57
$\varphi(65-74)$	0,28	$\varphi(65-74)$	0,29
$\varphi(75+)$	0,13	$\varphi(75+)$	0,09
$\gamma(<5)$	1,00	$\gamma(<0,5)$	1,00
$\gamma(5-14)$	2,78	$\gamma(0,5-1,0)$	0,49
$\gamma(15-24)$	4,42	$\gamma(1,0-3,0)$	0,37
$\gamma(25-34)$	6,62	$\gamma(3,0-5,0)$	0,32
$\gamma(35+)$	10,2	$\gamma(5,0-15,0)$	0,17
		$\gamma(\geq 15,0)$	0,11
* Первое значение приведено для когорты курящих, второе – для некурящих; в скобках даны значения для комбинированной когорты.			

тельства придают большую уверенность в надежности разработанной модели «Висмут».

Эта модель имеет те же особенности, что и модель BEIR VI. Но в отличие от последней в модели «Висмут» представлен только один, более подходящий вариант зависимости модифицирующего фактора  $\gamma_z$  – зависимость от мощности дозы. Кроме того, параметр  $\theta_b$  в модели «Висмут» имеет наибольшее значение во временном интервале  $\Delta t = 15 - 25$  лет в отличие от модели BEIR VI, в которой этот параметр максимален в начальном интервале  $\Delta t = 5 - 15$  лет. При этом имеет

место «обрубание» значения параметра от максимального значения до нуля при  $\Delta t \leq 5$  лет. Это трудно воспринять с позиции медико-биологических представлений о развитии злокачественных образований. Следует также учитывать, что модель «Висмут» разрабатывалась на несколько лет позже модели BEIR VI. Это дало возможность использовать ранее накопленный опыт и более поздние публикации.

В эпидемиологическом анализе рассматривалась вся немецкая когорта рабочих без разделения на курящих и некурящих. По этой причине в модели «Висмут» представлено только одно значение параметра  $\beta$ .

Таблица 3.4.

**Значения параметров модели «Висмут» [39]**

Параметры модели	Значение	95% ДИ
$\beta$ , WLM <sup>-1</sup>	0,0135	0,0070–0,0194
$\theta_{3-15}$	1,0	0,67–1,35
$\theta_{15-24}$	1,52	–
$\theta_{25+}$	0,56	0,45–0,68
$\phi_{<55}$	1,0	–
$\phi_{55-64}$	0,80	0,64–1,0
$\phi_{65-74}$	0,66	0,50–0,88
$\phi_{75+}$	0,49	0,30–0,83
$\gamma_{<0,5}$	1,0	0,53–1,88
$\gamma_{0,5-1,0}$	0,52	0,28–0,98
$\gamma_{1,0-3,0}$	0,36	0,23–0,56
$\gamma_{3,0-5,0}$	0,31	0,20–0,47
$\gamma_{5,0-15,0}$	0,25	0,17–0,38
$\gamma_{15,0+}$	0,12	–

*Современные модели радиационного риска, основанные на данных по эпидемиологии шахтеров. В конце 2000-х, начале 2010-х гг.*

был опубликован ряд работ, посвященных созданию модели радиационного риска при облучении когорт шахтеров. Модель Л. Томашека и соавт. была основана на данных по когортам шахтеров Франции и Чехии, для которых имелись наиболее подробные данные по инструментальному определению экспозиции по ДПР радона [40]. Аналогичная модель, но основанная на анализе 11 когорт шахтеров, была представлена Л. Томашеком в работе [41]. Особенностью данных моделей является учет возраста на момент облучения в явном виде. Для модели, основанной на анализе чешско-французской когорты, делались отдельные оценки значения параметра  $\beta$  для измеренных значений экспозиции и значений, оцененных косвенным образом. Результаты оценок приведены в табл. 3.5. Дополнительный относительный риск для различных вариантов модели представлен уравнениями

$$K_{ERR}(t_e, t, D) = (\beta_{изм} P_{изм} + \beta_{оцен} P_{оцен}) \cdot \exp [C_a(t_e - 30) + C_t(t - t_e - 20)] \quad (3.16)$$

или

$$K_{ERR}(t_e, t, D) = (\sum \beta_c \cdot P_c) \cdot \exp [C_a(t_e - 30) + C_t(t - t_e - 20)] \quad (3.17)$$

где  $t_e$  – возраст на момент облучения;  $t$  – достигнутый возраст;  $P_{изм}$ ,  $P_{оцен}$  – измеренная или оцененная экспозиция по ДПР радона;  $P_c$  – экспозиция по ДПР радона при различных уровнях ЭРОА радона, WLM. Параметры моделей, разработанных в Л. Томашеком и соавт., приведены в Табл. 3.5 и 3.6.

*Комбинированная модель «Радон-2011».* Прямое использование данных эпидемиологических исследований, выполненных среди горняков, для оценки радиационного риска при облучении населения радоном и его ДПР в жилищах имеет ряд ограничений. В основном эти ограничения обусловлены половозрастными различиями между когортами шахтеров и обычного населения и различиями в составе атмосферы в шахтах и в жилищах (концентрация аэрозолей, кратность воздухообмена, наличие других примесей и др.).

В связи с появившимися данными объединенного анализа эпидемиологических исследований случай-контроль связи рака легкого с облучением радоном в жилищах представляла интерес разработка

Таблица 3.5.

**Параметры модели радиационного риска, основанной  
на данных по когортам шахтеров Франции и Чехии [39]**

Параметр	Французская когорта		Чешская когорта		Объединенная когорта	
	Оценка	95% ДИ	Оценка	95% ДИ	Оценка	95% ДИ
Модель без учета уровня ДПР радона						
$\beta_{изм}$	0,056	0,019–0,159	0,043	0,022–0,073	0,042	0,024–0,072
$\beta_{оцен}$	0,006	-0,001–0,024	0,016	0,000–0,069	0,009	0,001–0,0024
$\exp(10C_a)$	0,58	0,21–1,43	0,47	0,26–0,78	0,45	0,28–0,70
$\exp(10C_l)$	0,37	0,12–1,01	0,57	0,32–0,96	0,52	0,32–0,81
Модель, учитывающая уровни ДПР радона						
$\beta_{изм < 0.5 WL}$					0,060	0,025–0,122
$\beta_{изм 0.5-1 WL}$					0,018	-0,003–0,054
$\beta_{изм 1-2 WL}$					0,042	0,022–0,076
$\beta_{изм 2-4 WL}$					0,040	0,021–0,073
$\beta_{изм > 4 WL}$			—		0,032	0,002–0,081
$\beta_{оцен}$					0,009	0,001–0,025
$\exp(10C_a)$					0,46	0,28–0,70
$\exp(10C_l)$					0,51	0,32–0,79

Таблица 3.6.

**Параметры модели радиационного риска Л. Томашека [39]**

Параметр	Оценка	95% ДИ
$\beta_{< 4 WL}$	0,0137	0,0102–0,0186
$\beta_{4-8 WL}$	0,0069	0,0045–0,0101
$\beta_{> 8 WL}$	0,0049	0,0037–0,0066
$\exp(10C_a)$	0,477	0,377–0,588
$\exp(10C_l)$	0,396	0,313–0,487

объединенной модели, учитывающей как временные и возрастные характеристики радиационного риска, полученные на основании исследований среди шахтеров, так и данные по уровням радиационных рисков, полученных для населения. Разработка подобной модели, названной «Радон-2011», а позже «Радон-2014» была сделана в работах [42, 43, 45].

Пусть мультипликативная зависимость доза-эффект для разового, однократного облучения легких экспозицией  $D$  в возрасте  $t_e$  задана в виде:

$$\lambda_r(t_e, t, D) = \lambda_0(s, t) \cdot K_{ERR}(t_e, t, D), \quad (3.18)$$

$\lambda_r(t_e, t, D)$  и  $\lambda_0(s, t)$  – повозрастные коэффициенты заболеваемости (или смертности) от радиогенного и спонтанного рака легких, соответственно,  $s$  – параметр, определяющий пол,  $K_{ERR}(t_e, t, D)$  – коэффициент дополнительного относительного риска, зависящий от возраста экспозиции  $t_e$ , возраста  $t$  проявления эффекта и величины разовой экспозиции  $D$ . Для него используется линейная зависимость от экспозиции  $D$ :

$$K_{ERR}(t_e, t, D) = \alpha(t_e, t) \cdot D. \quad (3.19)$$

Как и в других моделях риска в модели «Радон-2011» коэффициенты риска  $K_{ERR}(\dots)$  одинаковы для мужчин и женщин. В реальных расчетах риска зависимость от пола проявится только через функцию  $\lambda_0(s, t)$ , имеющую разное значение для мужчин и женщин.

Для протяженной во времени экспозиции зависимость доза-эффект  $\lambda_r(t_e, t, \{d\})$  определяется формулами [44]:

$$\lambda_r(t_e, t, \{d\}) = \lambda_0(s, t) \cdot K_{ERR}(t_e, t, \{d\}), \quad (3.20)$$

$$K_{ERR}(t_e, t, \{d\}) = \exp \int_{t_e}^t \alpha(t', t) \cdot d(t') \partial t' - 1 \quad (3.21)$$

где  $t_e$  – возраст начала экспозиции,  $d(t')$  – мощность экспозиции в текущем возрасте  $t'$ .

Функция  $\alpha(t', t)$  есть коэффициент перед первой степенью экспозиции  $D$  в дозовой зависимости  $K_{ERR}(t_e, t, D)$  (см. формулу 3.19). Для протяженной экспозиции зависимость от экспозиции согласно фор-

муле (3.21) становится нелинейной. При относительно малых уровнях воздействия, при которых значение интеграла в формуле (3.21) значительно меньше единицы, экспоненциальную функцию в ней можно разложить до нулевого и первого члена, получив приближенное выражение для  $K_{ERR}(t_e, t, \{d\})$ :

$$K_{ERR}(t_e, t, \{d\}) \approx \int_{t_e}^t \alpha(t', t) \cdot d(t') \partial t' \quad (3.22)$$

Отметим, что такие уровни воздействия имеют место во многих практических случаях и для них можно использовать приближенное выражение (3.22).

В моделях BEIR VI и «Висмут» фактически используется это приближение, хотя при относительно высоких экспозициях, характерных частично для исследований по когортам горняков, это приближение может давать существенную ошибку.

В обозначениях модели BEIR VI и «Висмут»:

$$\alpha(e, a) = \beta \cdot \theta_t \cdot \phi_a \cdot \gamma_z, \quad t = a - e, \quad z = d(e). \quad (3.23)$$

Используя определения (3.23) и формулу (3.21), запишем в окончательном виде:

$$K_{ERR}(t_e, t, \{d\}) = \exp(\sigma(t_e, t, \{d\})) - 1, \quad (3.24)$$

$$\sigma(e, a, \{d\}) = \beta \cdot \phi(a) \int_{t_e}^t [\theta(t - t') \gamma(d(t')) \cdot d(t')] \partial t' \quad (3.25)$$

или приближенное выражение, см. выражение (4.25),

$$K_{ERR}(t_e, t, \{d\}) \approx \sigma(e, a, \{d\}), \quad (3.26)$$

справедливое при малости величины  $\sigma(e, a, \{d\})$ .

Необходимо отметить, что как в модели BEIR VI, так и в модели «Висмут» коэффициенты  $\theta$ ,  $\phi$  и  $\gamma$  имеют фиксированные значения, что приводит к существенным разрывам функции риска при некоторых значениях возраста  $t$ , что вряд ли приемлемо с медико-биологических позиций. Поэтому для всех трех параметров модели  $\theta(x)$ ,  $\phi(x)$  и  $\gamma(x)$  была получена сплаженная зависимость от их аргументов, при этом для них предлагается одна функциональная зависимость следующего вида:

$$F(x) = A/[1 + B \cdot \exp(C \cdot x)] + D \quad (3.27)$$

Полученные коэффициенты этой зависимости  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  приведены в Табл. 3.7, а графики этих функций – на Рис. 4.5.

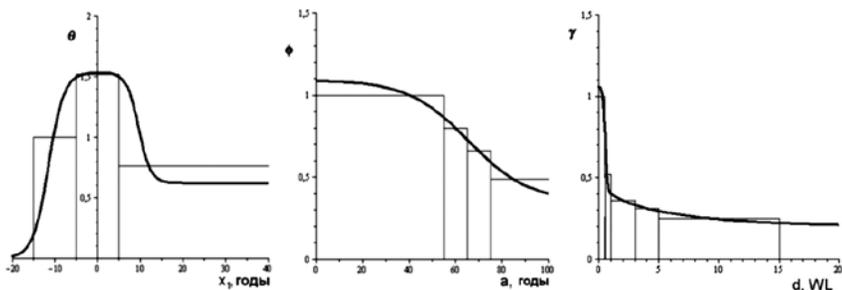
Таблица 3.7.

**Коэффициенты сглаженной зависимости вида (3.27) для параметров  $\theta(x)$ ,  $\varphi(x)$  и  $\gamma(x)$  модели «Радон-2011»**

Параметр модели	Область определения	A	B	C	D
$\theta(x)$ ( $x \equiv t-t_e-20$ , лет)	$x \leq 0$ ( $t-t_e \leq 20$ )	1,53	0,00183	-0,551	0
	$x > 0$ ( $t-t_e > 20$ )	0,911	0,00095	0,722	0,62
$\varphi(x)$ ( $x \equiv t$ , лет)	$t > 0$	0,741	0,00654	0,0766	0,35
$\gamma(x)$ ( $x \equiv d$ [WL])	$d \leq 1$	0,668	0,00429	10,0	0,393
	$d > 1$	0,109	-0,711	-0,0759	0,08

Выбор этих коэффициентов определялся равенством их средних значений на указанных в табл. 3.7 отрезках значениям параметров  $\theta(x)$ ,  $\varphi(x)$  и  $\gamma(x)$  в модели «Висмут» (см. рис. 3.5).

Параметр  $\theta(x)$  как функция аргумента  $x$  имеет разные зависимости в областях  $x \leq 0$  и  $x > 0$ , непрерывно соединенные в точке  $x = 0$ . Аналогично точка  $x = 1$  разделяет две разные функциональные зависимости параметра  $\gamma(x)$ , также непрерывные в этой точке (см. рис. 3.5).



**Рис. 3.5.** Сглаженные зависимости параметров модели  $\theta$  от величины  $x$  ( $t-t_e-20$ ),  $\varphi$  от возраста  $t$  и  $\gamma$  от уровня ЭРОА радона  $d$ . Столбиками показаны значения этих параметров из модели «Висмут».

Для полного соответствия предлагаемой модели результатам эпидемиологических исследований была проведена процедура нормировки таким образом, чтобы дополнительный относительный риск возникновения рака легких, рассчитанный по модели Радон-2011, соответствовал данным работы [16]: 16% на 100 Бк/м<sup>3</sup> по объемной активности <sup>222</sup>Rn в жилом помещении.

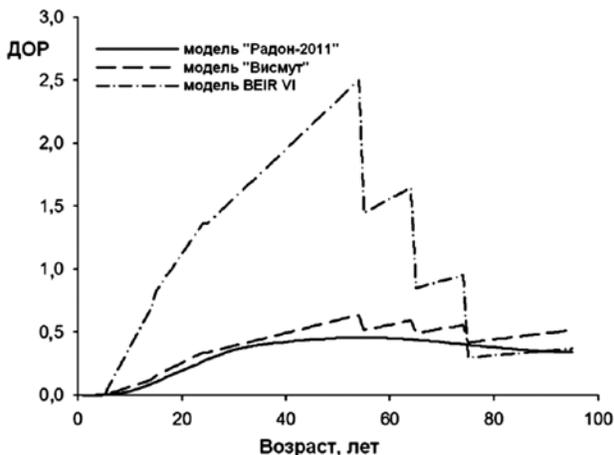
При выборе условий нормировки было принято, что коэффициент равновесия  $F=0,4$ , а доля пребывания населения в жилищах  $p=0,7$ , что соответствует средним параметрам объединенного Европейского исследования [16]. В объединенном Европейском исследовании максимальный возраст больных раком легкого был в интервале 90 – 94 года, поэтому оценка радиационного риска проводилась вплоть до возраста 95 лет. В работе [16] оценка относительного риска (16% на 100 Бк/м<sup>3</sup>) для группы «случай» была получена для 30-летнего периода облучения, предшествующего 5-летнему минимальному латентному периоду перед постановкой диагноза «рак легких». Условия облучения в более ранний период практически ни в одном исследовании, входившем в объединенный анализ, восстановить не удалось. Вместе с тем, очевидно, что приравнять облучение в отдаленный период нулю нельзя. В связи с этим при проведении нормировки рассматривалась ситуация равномерного пожизненного облучения. При нормировке подгонялось исключительно значение коэффициента  $\beta$ . Остальные параметры модели имели значения, представленные выше.

В результате нормировки было получено, что для модифицированной модели «Радон-2011» численное значение коэффициента  $\beta$  должно быть равным:

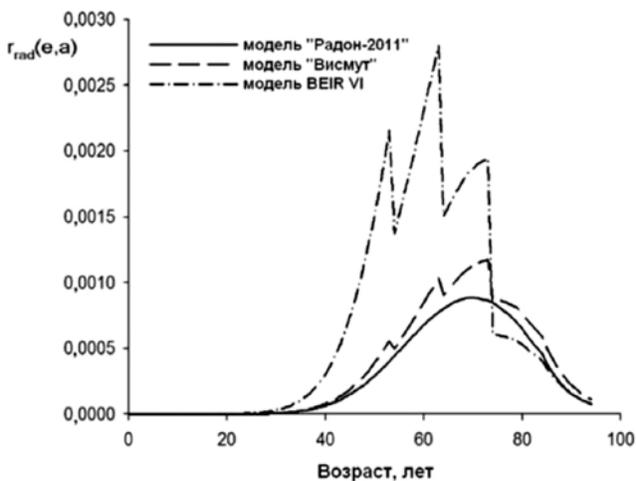
$$\beta = 0,0156 \text{ WLM}^{-1}, 95\% \text{ ДИ } (0,0081 - 0,0225). \quad (3.28)$$

Коэффициент относительного риска  $K_{ERR}(\dots)$  для разовой экспозиции рассчитывается по формуле (3.19), а для протяженной экспозиции по формуле (3.24).

Для сравнения на Рис. 3.6 и 3.7 приведены функции относительного и абсолютного рисков, выполненные по моделям «Радон-2011», BEIR VI и «Висмут» в варианте пожизненной хронической экспозиции 1 WLM/год начиная с нулевого возраста. Можно заметить, что для модели BEIR VI имеют место значительно бóльшие значения



*Рис 3.6. Сравнение оценок дополнительного относительного риска (ДОР) при пожизненном хроническом облучении ДПР радона с экспозицией 1 WLM/год.*



*Рис 3.7. Сравнение оценок абсолютной вероятности возникновения радиационно-индуцированного рака легкого ( $r_{rad}(e,a)$ ), при пожизненном хроническом облучении ДПР радона с экспозицией 1 WLM/год*

этих функций, чем для модели «Висмут». Кроме того, эти бóльшие значения не подтверждаются результатами данных по населению [16, 17]. Это одна из причин, почему за основу разработки модели «Радон-2011» были приняты данные модели «Висмут» с учетом результатов объединенного анализа эпидемиологических исследований.

### *Литература*

1. Human respiratory tract model for radiological protection. Annals of the ICRP 24 (1-3). ICRP publication 66 // ICRP. – Oxford: Pergamon Press. – 1994.
2. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1. ICRP Publication 130. Ann. ICRP 44(2) // ICRP. – 2015
3. Effects of Ionizing Radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2006 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes – Volume II. Annex E (“Sources-to-effects assessment for radon in homes and workplaces”) // UNSCEAR. – 2009.
4. Риск возникновения рака легкого при облучении радоном и продуктами его распада. Заявление по радону / под ред. *М.В. Жуковского, С.М. Киселева, А.Т. Губина* / пер. Публикации 115 МКРЗ // ICRP. – Москва: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России». – 2013.
5. Защита от радона-222 в жилых зданиях и на рабочих местах. Публикация 65 МКРЗ // ICRP. – М.: Энергоатомиздат. – 1995.
6. *Lubin J.H.* Radon and Lung Cancer Risk: A Joint Analysis of 11 Underground Miner Studies. Publication No. 94-3644 // *Lubin J.H., Boice J.D., Jr., Edling C.* [et al.] – US National Institutes of Health, Bethesda, MD. – 1994
7. The Health Effects of Exposure to Indoor Radon. National Academy of Sciences, National Research Council // Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations (BEIR VI). – Washington, DC: National Academy Press. – 1999.
8. *Tomášek L.* Lung cancer in French and Czech uranium miners – risk at low exposure rates and modifying effects of time since exposure and

- age at exposure / *L. Tomášek, A. Rogel, M. Tirmarche* [et al.] // *Radiat. Res.* – 2008. Vol. 169. – P. 125–137.
9. *Lubin J.H.* Radon-exposed underground miners and inverse dose-rate (protraction enhancement) effects/ *Lubin J. H., Boice J. D., Jr, Edling, C.* [et al.] // *Health Phys.* – 1995. Vol. 69. – P. 494–500
  10. *Tomášek L.* Czech miner studies of lung cancer risk from radon/ *L. Tomášek* // *J. Radiol. Prot.* – 2002. Vol. 22. – P. A107 – A112.
  11. Indoor Air Quality Research: Report on a WHO Meeting, 27–31 August 1984, Stockholm // World Health Organization, Copenhagen: WHO. – 1986.
  12. Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans: Man-made Fibres and Radon. IARC 43. International Agency for Research on Cancer // IARC. – Lyon. – 1988.
  13. Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective // World Health Organisation (WHO). – Geneva: WHO Press. – 2009.
  14. *Lubin, J.H.* Lung cancer risk from residential radon: meta-analysis of eight epidemiologic studies / *J.H. Lubin, J.D. Boice, Jr.* // *J.Natl. Cancer Inst.* – 1997. Vol. 89. – P. 49–57.
  15. Yarmoshenko I. V. Meta-analysis of twenty radon and lung cancer case control studies // *Radioactivity in the environment* / *I.V. Yarmoshenko, I.A. Kirđin, M.V. Zhukovsky, S.Y. Astrakhanseva* // A companion series to the *Journal of Environmental Radioactivity.* – 2005. Vol. 7. P. 762–771.
  16. *Darby S.* Residential radon and lung cancer – detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14 208 persons without lung cancer from 13 epidemiological studies in Europe/ *S. Darby, D. Hill, H. Deo, [et al.]*. // *Scand. J. Work Environ. Health.* – 2006. Vol. 32 (Suppl. 1). – P. 1–84.
  17. *Krewski D.A.* combined analysis of North American case–control studies of residential radon and lung cancer / *D. Krewski, J.H. Lubin, J.M. Zielinski* [et al] // *J. Toxicol. Environ. – Health Part A.* 2006. Vol. 69 (7). – P. 533–597.
  18. *Lubin J. H.* Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies / *J.H. Lubin, Z.Y. Wang, J.D. Boice, Jr.* [et al.] // *Int. J. Cancer.* – 2004. Vol. 109. – P. 132–137.

19. *Kirdin I.A., Lezhnin V.L., Yarmoshenko I.V. et. al.* Radon and lung cancer case-control study in Middle Ural / *I.A. Kirdin, V.L. Lezhnin, I.V. Yarmoshenko* [et. al.] // Proc. of the IRPA Regional Congress on Radiation Protection in Central Europe “Radiation Protection And Health”. – Zagreb, 2002. – P. 30-05 1-6.
20. *Hunter N.* Calculation of lifetime lung cancer risks associated with radon exposure, based on various models and exposure scenarios / *N. Hunter, C.R. Muirhead, F. Bochicchio, R.G. Haylock* // *J. Radiol. Prot.* – 2015, Vol. 35, No 3. – P. 539–555.
21. *Stidley C.A., Samet J.M.* A review of ecologic studies of lung cancer and indoor radon / *C.A. Stidley, J.M. Samet* // *Health Phys.* – 1993. Vol. 65(3). – P. 234–251.
22. *Cohen B.L.* A test of the linear-no threshold theory of radiation carcinogenesis. / *B.L. Cohen* // *Environ Res.* – 1990. Vol. 53(2). – P. 193-220.
23. *Cohen B.L.* Test of the linear-no threshold theory of radiation carcinogenesis for inhaled radon decay products/ *B.L. Cohen* // *Health Phys.* – 1995. Vol. 68(2). – P. 157-174.
24. *Cohen B.L.* Lung cancer rate vs. mean radon level in U.S. counties of various characteristics / *B.L. Cohen* // *Health Phys.* – 2008. Vol. 72(1). – P. 114–119.
25. *Cohen B.L.* Problems in the radon vs. lung cancer test of the linear no-threshold theory and a procedure for resolving them / *B.L. Cohen* // *Health Phys.* – 1997. Vol. 72(4). – P. 623–628.
26. *Cohen B.L.* Response to criticisms of Smith et al. / *B.L. Cohen* // *Health Phys.* 1998. Vol. 75(1). – P. 23–33.
27. *Cohen B.L.* Testing a BEIR-VI suggestion for explaining the lung cancer vs. radon relationship for U.S. counties / *B.L. Cohen* // *Health Phys.* – 2000. Vol. 78(5). – P. 522–527.
28. *Puskin J.S.* Smoking as a confounder in ecologic correlations of cancer mortality rates with average county radon levels / *J.S. Puskin* // *Health Phys.* – 2003. Vol. 84(4). – 526–532.
29. *Heath C.W. Jr.,* Residential radon exposure and lung cancer risk: commentary on Cohen’s county-based study / *C.W. Heath. Jr., P.D. Bond, D.G. Hoel* [et al.] // *Health Phys.* – 2004. Vol. 87(6). – P. 647–655.

30. *Little M.P.* The statistical power of epidemiological studies analyzing the relationship between exposure to ionizing radiation and cancer, with special reference to childhood leukemia and natural background radiation / *M.P. Little, R. Wakeford, J.H. Lubin, G.M. Kendall* // *Radiat Res.* – 2010. Vol. 174(3). – P. 387–402.
31. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Ionizing Radiation, Part 2: Some Internally Deposited Radionuclides // IARC. – 2001.
32. Рекомендации Международной комиссии по радиологической защите 1990 года. Публикация 60 МКРЗ // ICRP. – М.: Энергоатомиздат. – 1994. Ч.2.
33. Риск заболевания раком легких от воздействия дочерних продуктов распада радона в помещениях. Публикация 50 МКРЗ // ICRP. – М.: Энергоатомиздат, 1992.
34. Health effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation // BEIR V Report. National Academy of Science. – Washington: National Academy Press. – 1990.
35. The Health Effects of Exposure to Indoor Radon. National Academy of Sciences, National Research Council // Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations (BEIR VI). – Washington, DC: National Academy Press. – 1999.
36. National Research Council. Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation // BEIR VII Phase 2. – Washington, DC: The National Academies Press. – 2006.
37. Appendix A. Epidemiological studies of radiation and cancer // UNSCEAR – 2009.
38. Health Risk of Radon and Other Internally Deposited Alpha-Emitters. US National Research Council // Report BEIR IV. – Washington: National Academy Press. – 1988.
39. *Grosche B.* Lung cancer risk among German male uranium miners: a cohort study, 1946–1998 / *B. Grosche, M. Kreuzer, M. Kreishemer, M. Schnelzer, A. Tschense* // *Br. J. Cancer.* – 2006. Vol. 95. – P. 1280–1287.
40. *Tomasek L.* Lung Cancer in French and Czech Uranium Miners: Radon-Associated Risk at Low Exposure Rates and Modifying Effects of Time since Exposure and Age at Exposure / *L. Tomasek, A. Rogel,*

- M. Tirmarche, N. Mitton, D. Laurier // Rad. Res. 12008. Vol. 69. P. 125–137.*
41. *Tomasek L. Effect of age at exposure in 11 underground miners studies / L. Tomasek L. // Radiat. Prot. Dosim. – 2014. Vol. 160. – P. 120–123.*
  42. *Демин В.Ф. Модифицированная модель оценки риска при ингаляционном поступлении радона / В.Ф. Демин, М.В. Жуковский, С.И. Иванов, И. В. Ярмошенко // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2011. Т.56, №5. – С. 21–30.*
  43. *Zhukovsky M.. The modified model of radiation risk at radon exposure / M. Zhukovsky, V. Demin, I. Yarmoshenko // Radiat. Prot. Dosim. – 2014. Vol. 160. – P. 134–137.*
  44. *Демин В.Ф. Общая методика оценки риска воздействия на здоровье населения разных источников опасности / В.Ф. Демин, С.И. Иванов, С.И. Новиков // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2009. Т. 54, № 1. – С. 5–15.*
  45. *Демин В.Ф. Риск от воздействия радона на здоровье человека: методы оценки и практическое применение / В.Ф. Демин, М.В. Жуковский, С.М. Киселев // Атомная энергия. – 2015. т. 118, вып.1. – С. 42 – 46.*

**Глава 4**  
**СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ**  
**НАСЕЛЕНИЯ РАДОНОМ И ДОЧЕРНИМИ ПРОДУКТАМИ**  
**ЕГО РАСПАДА**  
*(М.В.Жуковский, И.В. Ярмошенко)*

*Расчет дозовых нагрузок при ингаляции дочерних продуктов распада радона является важной задачей для целей регулирования радиационной защиты. Однако пока не найдено единого систематического подхода к ее решению. В настоящей главе обсуждаются два основных подхода к оценке доз облучения населения от данного компонента природного облучения в их эволюционном развитии. Первый заключается в оценке поглощенной дозы в легочной ткани осевших ДПР радона с использованием дозиметрических моделей поведения радионуклидов в легких (модель респираторного тракта МКРЗ 66). Второй (условный дозовый переход, МКРЗ 65) состоит в сопоставлении смертности от рака легкого среди шахтеров урановых рудников со смертностью среди лиц, подвергшихся общему внешнему облучению (жертв атомной бомбардировки в Хиросиме и Нагасаки).*

Система дозиметрических величин формируется как результат развития радиобиологии, дозиметрии и радиационной безопасности. Критерии безопасности в значительной степени определяются обществом, поэтому в разных странах сформировались и различные системы дозиметрических величин. Важную роль в унификации этих систем играет Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) – независимая организация, объединяющая экспертов в области биологического действия излучения, дозиметрии и радиационной безопасности. Под влиянием регулярно публикуемых Рекомендаций

МКРЗ [1] сформировалась современная система дозиметрических величин, включающая:

- физические величины, являющиеся мерой воздействия ионизирующего излучения на вещество (поглощенная доза, керма, флюенс частиц);
- нормируемые величины, являющиеся некой мерой ущерба (вреда) от воздействия излучения на человека (эквивалентная и эффективная дозы);
- операционные величины, являющиеся непосредственно определяемыми в измерениях величинами, предназначенными для оценки нормируемых величин при радиационном контроле (амбиентный и индивидуальный эквивалент дозы).

Поглощенная доза  $D$  определяется соотношением

$$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm}, \quad (4.1)$$

где  $d\bar{\varepsilon}$  – средняя энергия, переданная ионизирующим излучением веществу в элементе объема;  $dm$  – масса вещества в этом элементе объема. Единицей СИ для поглощенной дозы является Дж·кг<sup>-1</sup> со специальным названием «грей» (Гр). Понятие поглощенной дозы определено так, чтобы дать ее значение в каждой точке вещества. Однако на практике поглощенные дозы зачастую усредняются по большим объемам ткани. Таким образом, предполагается, что при облучении в малых дозах поглощенная доза в отдельном органе или ткани может быть связана с радиационным вредом от стохастических эффектов во всех частях этого органа или ткани с точностью, достаточной в контексте радиационной защиты. Для целей радиационной безопасности полезно определить среднюю поглощенную дозу в ткани или органе  $\overline{D}_T$

$$\overline{D}_T = \frac{\int_T D(x,y,z)\rho(x,y,z)dV}{\int_T \rho(x,y,z)dV} \quad \text{или} \quad \overline{D}_T = \frac{\varepsilon_T}{m_T}, \quad (4.2)$$

где  $\varepsilon_T$  – полная энергия, переданная ткани или органу;  $m_T$  – масса этой ткани или органа;  $V$  – объем отдела органа  $T$ ,  $D$  – поглощенная доза в точке  $(x,y,z)$  в этом отделе, а  $\rho$  – массовая плотность в этой точке. На

практике, средняя поглощенная доза в органе или ткани обычно записывается, как  $D_T$ .

Многочисленные данные биологических исследований, а также многочисленные клинические данные наглядно продемонстрировали, что при одинаковом значении поглощенной дозы вероятность возникновения наблюдаемых биологических эффектов для различных видов излучения могут существенно различаться. Оказалось, что плотноионизирующее излучение ( $\alpha$ -частицы, нейтроны, тяжелые ионы) оказывают существенно большее биологическое воздействие, чем редкоионизирующее излучение ( $\beta$ -частицы,  $\gamma$ -кванты). Для учета повышенной биологической эффективности плотноионизирующего излучения МКРЗ [2] предлагает использовать три различных коэффициента:

- относительную биологическую эффективность;
- коэффициент качества;
- взвешивающий коэффициент излучения  $w_R$ .

Следует отметить, что, вопреки звучащим иногда заявлениям, ни один из указанных коэффициентов не является «устаревшим» или «отмененным». Каждый из упомянутых коэффициентов является действующим, однако, применяемым в своей специфической области использования. Рассмотрим эти коэффициенты более подробно.

*Относительную биологическую эффективность* (ОБЭ) оценивают сравнением дозы излучения, вызывающей определенный биологический эффект, с дозой стандартного излучения, обуславливающей тот же эффект. Ранее в качестве стандартного принималось рентгеновское излучение, генерируемое при напряжении на трубке в 180–250 кВ. Значение ОБЭ вычисляют из отношения сравниваемых доз:

$$\text{ОБЭ} = \frac{D_\gamma}{D_X} \quad (4.3)$$

где  $D_\gamma$  – доза рентгеновского или  $\gamma$ -излучения, Гр;  $D_X$  – доза изучаемого излучения, Гр; при этом эффект сравнивают по одному и тому же показателю. В настоящее время принимается, что в качестве стандартного можно использовать  $\gamma$ -излучение, которое широко применяется при лучевой терапии опухолей и для которого соответственно известны количественные данные о связи с дозой самых разных эффектов поражения. Численные значения ОБЭ определяются на основании ла-

бораторных, клинических и, иногда, эпидемиологических исследований. Значение поглощенной дозы (иногда средней дозы, поглощенной в органе или ткани), умноженное на относительную биологическую эффективность называется взвешенной по ОБЭ дозой и используется для оценки вероятности возникновения детерминированных или стохастических эффектов.

*Коэффициент качества.* Так как установлено, что вероятность стохастических эффектов зависит от качества излучения, то по традиции вводится взвешивающий коэффициент для модификации поглощенной дозы и определения эквивалента дозы. Этот безразмерный коэффициент, называемый коэффициентом качества  $Q$ , задается как функция неограниченной линейной передачи энергии. Неограниченная линейная передача энергии в данной среде определяется Международной комиссией по радиационным единицам как:

$$L_{\infty} = \frac{dE}{dL} , \quad (4.4)$$

где  $dE$  – энергия, потерянная заряженной частицей при прохождении расстояния  $dL$ .

Численная зависимость коэффициента качества от неограниченной линейной передачи энергии задана как:

$$Q(L_{\infty}) = \begin{cases} 1 & L_{\infty} < 10 \text{ кэВ/мкм} \\ 0,32L_{\infty} - 2,2 & 10 \leq L_{\infty} \leq 100 \text{ кэВ/мкм} \\ 300/\sqrt{L_{\infty}} & L_{\infty} > 100 \text{ кэВ/мкм} \end{cases} \quad (4.5)$$

Нормируемые или защитные величины, в которых выражены основные дозовые пределы (эквивалентная и эффективная дозы), непосредственно измерить невозможно. Для оценки значений нормируемых величин при радиационном контроле предназначены операционные величины, которые являются непосредственно определяемыми в измерениях величинами. Как правило, это значения поглощенной дозы в биологической ткани, полученные при определенных условиях измерений, умноженные на значения коэффициента качества. В основном параметр  $Q$  используется для расчета операционных

величин эквивалента дозы (амбиентного или индивидуального), используемых при проведении мониторинга внешнего облучения. Единица измерения эквивалента дозы – зиверт (Зв).

*Взвешивающие коэффициенты излучения,  $w_R$* , были установлены при определении понятий защитных величин, начиная с Публикации МКРЗ 60 [1]. Они являются коэффициентами, на которые умножается средняя поглощенная доза в какой-либо ткани или органе для того, чтобы учесть вред, вызываемый различными видами излучения по отношению к фотонному излучению. Полученная величина называется эквивалентной дозой и относится к нормируемым (защитным) дозиметрическим величинам. Численные значения  $w_R$  устанавливаются для излучений различного вида и энергий, падающих на поверхность тела снаружи, или испускаемых радионуклидами, находящимися внутри организма. Одни и те же значения взвешивающих коэффициентов излучения,  $w_R$ , применяются ко всем тканям и органам вне зависимости от того, что реальное поле излучения варьирует и деградирует, производя вторичные излучения, имеющие различное качество. Таким образом, значение  $w_R$ , может рассматриваться как коэффициент, учитывающий качество излучения, усредненное по различным органам и тканям организма. Численные значения взвешивающих коэффициентов  $w_R$  приведены в публикациях МКРЗ [1–3]. Для интересующих нас продуктов распада радона  $w_R = 1$  для  $\beta$ -частиц и  $\gamma$ -квантов, а для  $\alpha$ -излучения принимается значение  $w_R = 20$ . Единица измерения эквивалентной дозы – зиверт (Зв).

*Эффективная доза* – это взвешенная по тканям сумма эквивалентных доз для всех рассмотренных тканей и органов организма, задаваемая в виде:

$$\sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} \quad \text{или} \quad \sum_T w_R H_T \quad (4.6)$$

где  $H_T$  – эквивалентная доза в органе или ткани Т,  $D_{T,R}$  – поглощенная доза в органе Т от вида излучения R,  $w_T$  – коэффициент взвешивания для ткани. Единица измерения для эффективной дозы та же, что и для поглощенной дозы – Дж·кг<sup>-1</sup>, а ее специальное название – «зиверт» (Зв). Главными целями использования эффективной дозы при радиационной защите, как персонала, так и населения является:

- перспективная оценка дозы для планирования и оптимизации защиты;
- ретроспективная оценка дозы для подтверждения соблюдения пределов дозы или для сравнения ее с граничными дозами или референтными уровнями.

При практическом внедрении радиационной защиты эффективная доза используется для управления рисками стохастических эффектов у персонала и населения [3]. Эффективная доза предназначена для использования как защитная величина, оцениваемая на основании справочных показателей, и поэтому не рекомендуется использовать ее ни для эпидемиологических оценок, ни для детальных ретроспективных оценок индивидуального облучения и риска. В таких случаях скорее надо использовать наиболее подходящие данные по биологической эффективности и факторам риска. Дозы в органах и тканях, а не эффективные дозы, требуются для оценки вероятности индукции рака у облученных индивидуумов. Для оценки тканевых реакций использование эффективной дозы недопустимо. В таких ситуациях необходимо оценить поглощенную дозу с учетом соответствующего значения ОБЭ как основы любой оценки радиационных биологических эффектов.

Воздействие ДПР радона на человека всегда представляло определенные сложности для проведения дозиметрических оценок:

- во-первых, оно относится к внутреннему облучению и достаточно сложно поддается индивидуальному радиационному мониторингу, относительно легко проводимому в случае внешнего радиационного облучения;
- во-вторых, вследствие малого периода полураспада ДПР радона мониторинг облучения радоном не может быть выполнен стандартными методами, применяемыми при мониторинге внутреннего облучения;
- в-третьих, при ингаляции ДПР радона происходит облучение исключительно тканей респираторного тракта, в то время как на остальные органы и ткани человека радиационное воздействие пренебрежимо мало;

- в-четвертых, все основное облучение осуществляется короткопробежными, сильноионизирующими  $\alpha$ -частицами.

Перечисленные факторы привели к тому, что дозиметрические оценки облучения человека за счет ингаляционного поступления ДПР радона в ряде случаев производятся косвенными методами. Величиной, позволяющей, так или иначе, оценить радиационное воздействие ДПР радона на человека является т.н. экспозиция по ЭРОА радона, которую мы рассматривали в главе 2.

$$P = \int_0^T A_{\text{ЭКВ}}^{Rn}(t) dt = \overline{A_{\text{ЭКВ}}^{Rn}} \cdot T, \quad (4.7)$$

Величина экспозиции может быть выражена либо в единицах  $\text{Бк} \cdot \text{ч} \cdot \text{м}^{-3}$ , либо во внесистемных единицах WLM.

Для оценки величины дозового перехода от экспозиции по ДПР радона к эффективной дозе ранее применялись расчетные методы с использованием различных моделей поведения радионуклидов в респираторном тракте. МКРЗ разработала модель респираторного тракта человека, чтобы рассчитать дозу облучения от присутствующих в воздухе радионуклидов [4]. Описание данной модели приведено в приложении к настоящей главе. Однако сразу после разработки данной модели, учитывая многочисленные неопределенности, МКРЗ не рекомендовало использовать данную модель для оценки поглощенной дозы на легкое от вдыхания радона и дочерних продуктов его распада вследствие недостаточного учета в ней влияния всех неопределенностей, связанных с входными данными, а также всех допущений, встроенных в эту конкретную модель.

В своей Публикации 65 [5] Международная комиссия по радиологической защите рекомендовала отказаться от использования дозиметрических моделей респираторного тракта при переходе от экспозиции по ЭРОА радона к эффективной дозе. На основании эпидемиологических данных по смертности среди шахтеров урановых рудников была получена величина пожизненного риска (ущерб) от хронического профессионального облучения. Значение номинального коэффициента вероятности (смертности) составило  $2,83 \cdot 10^{-4} \text{ WLM}^{-1}$  как для персонала, так и для населения в целом независимо от

пола. Далее переход от экспозиции по потенциальной энергии к эффективной дозе осуществлялся прямым сравнением ущерба, связанного с единицей эффективной дозы при внешнем облучении и единицей экспозиции радона. Согласно Публикации 60 МКРЗ [1] ущерб на единицу эффективной дозы составляет  $5,6 \cdot 10^{-5}$  мЗв<sup>-1</sup> для персонала и  $7,3 \cdot 10^{-5}$  мЗв<sup>-1</sup> для населения. В терминах ущерба экспозиция по ЭРОА радона в 1 WLM эквивалентна эффективной дозе 5,06 мЗв для персонала и 3,88 мЗв для населения. Это отличие полностью обусловлено различиями коэффициентов ущерба для эффективной дозы согласно Публикации 60 МКРЗ. Такой переход, выполненный на основании равенства ущербов, а не на дозиметрических моделях, называется *условным дозовым переходом*. Численные значения коэффициентов дозового перехода (КДП) от экспозиции по ЭРОА радона к эффективной дозе, описанные в различных литературных источниках, приведены в табл. 4.1.

Вместе с тем, с появлением современных моделей экстраполяции радиационного риска и уточненных данных по дозиметрической модели респираторного тракта, к оценкам КДП, приведенных в табл. 4.1, появилось значительное количество замечаний.

Первая группа замечаний относится к КДП, рекомендованным Публикацией 65 МКРЗ и полученным при помощи метода условного дозового перехода. С момента выхода в свет в 1993 г. Публикации 65 МКРЗ появился ряд дополнительных публикаций, посвященных новым моделям экстраполяции радиационного риска при облучении ДПР радона [11–15], уточненным по последним эпидемиологическим данным [16, 17]. Появились дополнительные данные по моделям оценки радиационного риска при внешнем облучении человека, базирующиеся на данных многолетних наблюдений за лицами, подвергшимися атомным бомбардировкам в Хиросиме и Нагасаки [18]. В Публикации 65 МКРЗ, базирующейся исключительно на данных по эпидемиологии среди мужчин-шахтеров, как для мужчин, так и для женщин принимались одинаковые значения абсолютного пожизненного риска на единицу экспозиции по ЭРОА радона. При этом не учитывалось, что спонтанная частота возникновения рака легких у женщин в несколько раз ниже, чем у мужчин. В связи с этим, учиты-

Таблица 4.1.

**Литературные данные по КДП от экспозиции  
по ЭРОА радона к эффективной дозе**

Тип облучения	Метод расчета	Единица измерения		Источник
		нЗв/ (Бк·ч·м <sup>-3</sup> )	мЗв/ WLM	
Рабочие места, жилища	Дозиметрическая модель	10	6,2	НКДАР ООН 1988 [6]
Рабочие места, жилища	Дозиметрическая модель	9	5,6	НКДАР ООН 1993 и 2000 [7, 8]
Рабочие места	Дозиметрическая модель	17	10	Публикация МКРЗ 47 [9]
Рабочие места, жилища	Дозиметрическая модель	10	6,2	Публикация МКРЗ 50 [10]
Жилища	Условный дозовый переход	6,1	3,88	Публикация МКРЗ 65 [5]
Рабочие места	Условный дозовый переход	7,9	5,06	Публикация МКРЗ 65 [5]

вая, что можно считать достаточно обоснованным, что радиационно-индуцированный рак легких описывается одним из вариантов мультипликативной модели экстраполяции радиационного риска, абсолютный радиационный риск для женщин на единицу экспозиции должен быть заметно ниже. По-видимому, при отсутствии надежных эпидемиологических данных, справедливо говорить об одинаковом (или близком) значении дополнительного относительного риска для мужчин и женщин при облучении радоном. В Публикации 65 недостаточно четко показан возможный диапазон разброса оценок КДП от экспозиции по ЭРОА радона к эффективной дозе, а также влияние на эти значения таких факторов как ожидаемая продолжительность жиз-

ни облучаемой популяции и спонтанная частота возникновения рака легких, характерные для рассматриваемой группы людей.

Вторая группа вопросов относится к оценкам КДП, сделанным на основе дозиметрических моделей респираторного тракта. Известно, что эквивалентные дозы облучения, создаваемые при ингаляционном поступлении радионуклидов, в существенной степени зависят как от дисперсности аэрозолей, так и от скорости перехода радионуклидов из легких в жидкости организма (типа соединения при ингаляционном поступлении). К сожалению, в работах [19, 20], посвященных оценке КДП, не учитывалась зависимость этих коэффициентов от ингаляционного типа радионуклидов и соотношения между активностями «свободных» атомов ДПР радона и атомов, связанных с аэрозолями, зависящего от параметров атмосферы в помещении. Большой интерес представляет работа [21], в которой на основании большого объема практических измерений показано, что соотношение между «свободными» атомами ДПР радона и атомами, связанными с аэрозолями, зависит от территории, на которой проводятся исследования, и режима содержания зданий. В работе приводится эмпирическая логарифмически-степенная зависимость КДП от величины коэффициента равновесия  $F$ . К сожалению, в данной работе для расчетов КДП использованы устаревшие дозиметрические модели респираторного тракта, поэтому сделанные в ней численные оценки нуждаются в проверке.

Оценка возможного диапазона значений КДП от экспозиции по ЭРОА радона к эффективной дозе как на основании метода условного дозового перехода, так и на основании дозиметрической модели респираторного тракта была сделана в работе [22]. При расчетах КДП с использованием условного дозового перехода исходными моделями экстраполяции радиационного риска были модели, взятые из различных источников. Для расчета риска возникновения солидных опухолей при воздействии редко ионизирующего излучения использовались следующие модели:

- 1) модели относительного и абсолютного риска BEIR VII [23];
- 2) различные линейные и линейно-квадратичные модели радиационного риска, представленные в докладе НКДАР ООН 2006 [24];

- 3) модели Фонда исследований радиационных эффектов: линейная модель, опубликованная в Докладе 13 [25] и линейная и линейно-квадратичная модели, опубликованные в Докладе 14 [26].

Для оценки полного ущерба при облучении всего тела дополнительно были рассчитаны риски возникновения радиационно-индуцированной лейкемии с использованием моделей:

- 1) линейно-квадратичные модели относительного и абсолютного риска BEIR VII [23];
- 2) линейно-квадратичные модели относительного и абсолютного радиационного риска, представленные в докладе НКДАР ООН 2006 [24] (квадратичные модели радиационного риска были исключены из рассмотрения в силу их неприемлемости при малых дозах);
- 3) линейно-квадратичные модели Фонда исследований радиационных эффектов [24].

Для расчета радиационных рисков при облучении радоном рассматривались модели, основанные на эпидемиологических данных по шахтерам урановых рудников:

- 1) Модель BEIR VI, основанная на эпидемиологических данных по 11 когортам шахтеров [28];
- 2) Модель WISMUT, базирующаяся на эпидемиологических данных по когорте шахтеров урановых рудников Германии [11, 29] (модификация модели BEIR VI с использованием оригинальных эпидемиологических данных);
- 3) Модель, основанная на анализе когорт шахтеров Франции и Чехии, учитывающая модифицирующие эффекты возраста на момент облучения и времени, прошедшего с момента облучения [12];
- 4) Модель WISMUT, базирующаяся на эпидемиологических данных по когорте шахтеров урановых рудников Германии [11, 30] (модификация модели [12] с использованием оригинальных эпидемиологических данных);
- 5) Модель Томашека, анализирующая данные исследований по 11 когортам шахтеров [31] (модификация модели [12] с

использованием другого набора эпидемиологических данных);

- 6) Модели возникновения рака при двухстадийной мутации, основанные на эпидемиологии когорт французско-чешской [32] и немецкой [33] когорт;
- 7) Модель, аналогичная модели BEIR VI, основанная на данных по заболеваемости и смертности от рака легкого в когорте шахтеров урановых рудников Эльдorado [34];
- 8) Модель, разработанная в Агентстве по охране окружающей среды США [35] (модификация модели BEIR VI).

Модели радиационного риска при облучении радоном подробно представлены в разделе 3.2.

Необходимо учитывать, что применение результатов эпидемиологических исследований на когортах шахтеров имеет свои ограничения для оценки радиационных рисков для населения, подвергающемуся облучению радоном в жилищах. Основными причинами этого являются различия между следующими параметрами:

- характеристиками когорт шахтеров и населения (распределение по полу, возрасту, курению и др.);
- параметрами атмосферы в шахтах и жилищах (кратность воздухообмена, концентрация аэрозолей и др.).

Кроме того, необходимо принимать во внимание, что оценки радиационных рисков при внешнем  $\gamma$ -облучении основываются на эпидемиологических данных как для мужчин, так и для женщин [23–27]. При этом во многих моделях радиационного риска параметры моделей для мужчин и женщин различны. Оценки риска при облучении радоном основаны на моделях, полученных на результатах эпидемиологических наблюдений когорт шахтеров, включающих только мужчин. Единственной причиной, позволяющей использовать для мужчин и женщин одинаковые модели риска, является тот факт, что оценки дополнительного относительного риска (ДОР) на единицу экспозиции, полученные в объединенном Европейском радоновом исследовании [16], практически одинаковы для обоих полов.

В связи с этим был сделан вывод, что модели, используемые при облучении радоном в жилищах, могут использовать зависимости от возраста и времени, прошедшего со времени облучения, аналогичные «шахтерским» моделям, но должны быть нормированы на результаты эпидемиологических исследований по облучению в жилищах. Пример такой модели представлен в работах [14, 15]. Для того чтобы сделать результаты расчетов для облучения населения более детальными дополнительно были перенормированы коэффициенты моделей [12, 29, 30, 32, 35]. Как и в работах [14, 15] было принято значение ДОР = 0,16 на 100 Бк/м<sup>3</sup> при постоянном облучении с рождения до возраста 95 лет.

При расчетах радиационного риска пожизненная вероятность смерти от солидных опухолей в целом, лейкемии или рака легкого для различных сценариев облучения рассчитывались как:

$$R = \int_{t_e}^{\infty} \lambda_r(t, t_e, d) \cdot \frac{p_0(t)}{p_0(t_e)} \left[ \exp\left(- \int_{t_e}^t \lambda_r(t', t_e, d) \cdot dt'\right) \right] dt, \quad (4.8)$$

где  $\lambda_r(t, t_e, d)$  – радиационно-индуцированная смертность от рака в возрасте  $t$  при облучении в возрасте  $t_e$ , дозой  $d$ ;  $p_0(t)$  – вероятность дожития до возраста  $t$ . Статистически ожидаемое сокращение продолжительности жизни при реализации радиационного риска может быть рассчитано как

$$\Delta l = \int_{t_e}^{\infty} \frac{p_0(t)}{p_0(t_e)} dt - \int_{t_e}^{\infty} \frac{p_0(t)}{p_0(t_e)} \left[ \exp\left(- \int_{t_e}^t \lambda(t', t_e, d) \cdot dt'\right) \right] dt. \quad (4.9)$$

Отношение  $L = \Delta l/R$  дает оценку среднего количества лет жизни, потерянных человеком при смерти от радиационно-индуцированного рака.

При классическом использовании условного дозового перехода [5] необходимо учитывать не только летальные риски, но и другие факторы ущерба. Для внешнего  $\gamma$ -облучения были вычислены средние взвешенные значения  $\bar{R}$  и  $\bar{L}$  для смертности от солидных опухолей и лейкемии. Ущерб  $Det_T$  для каждой из моделей радиационного риска при облучении радоном рассчитывалась в соответствии с подходами, принятыми в Публикации МКРЗ 103 [3]

$$Det_T = R_T [k_T + (1 - k_T)(q_{min} + k_T(1 - q_{min}))] \frac{L_T}{\bar{L}}, \quad (4.10)$$

где  $k_T$  — доля летальности рака данной локализации;  $q_{min}$  — минимальный взвешивающий коэффициент для нелетальных случаев рака ( $q_{min} = 0,1$  [3]). Для внешнего облучения значения ущерба рассчитывались исходя из средних значений  $\bar{R}_T$  и  $\bar{L}$ . Вследствие того, что модели радиационного риска НКДАР ООН и Фонда исследований радиационных эффектов полностью основываются на данных по когортам Хиросимы и Нагасаки, при расчетах применялось значение коэффициента  $DDREF = 1,5$  [23].

Коэффициент дозового перехода (dose conversion factor,  $DCF$ ) между экспозицией по ДПР радона и эффективной дозой рассчитывался как

$$DCF = \frac{Det_{lung}/P_{Rn}}{Det_{total}/D_\gamma}, \quad (4.11)$$

где  $P_{Rn}$  — экспозиция по ДПР радона (WLM);  $D_\gamma$  — доза равномерного облучения всего тела редкоизирующим излучением (Зв).

На начальной стадии анализа проводилось сопоставление оценок ущерба при общем облучении с ущербом, рассчитанным по «шахтерским» моделям. Рассматривалось как кратковременное облучение в заданном возрасте, так и пролонгированное облучение в течение десятков лет. В силу того, что в ряде использованных моделей расчета радиационных рисков зависимость доза-эффект не является линейной, расчеты коэффициентов условного дозового перехода были выполнены для различных уровней радиационного воздействия. Результаты расчетов представлены в табл. 4.2 и 4.3.

Таблица 4.2.

**Коэффициенты дозового перехода при высоких уровнях радиационного воздействия (однократное облучение 300 мЗв и 50 WLM или пролонгированное облучение 20 мЗв/год и 4 WLM/год)**

Возраст на момент облучения	Пол	Коэффициент дозового перехода	
		мЗв/WLM	нЗв/(Бк·ч·м <sup>3</sup> )
20	Мужчины	11,8	18,5
	Женщины	3,1	4,8
25	Мужчины	11,6	18,2
	Женщины	3,1	4,8
30	Мужчины	12,1	19,0
	Женщины	3,3	5,1
35	Мужчины	13,3	20,8
	Женщины	3,5	5,6
40	Мужчины	15,1	23,8
	Женщины	3,7	5,9
45	Мужчины	16,5	25,9
	Женщины	3,7	5,8
50	Мужчины	16,7	26,1
	Женщины	3,3	5,2
60	Мужчины	13,8	21,7
	Женщины	2,6	4,1
70	Мужчины	10,1	15,8
	Женщины	2,2	3,4
80	Мужчины	7,9	12,4
	Женщины	1,8	2,9
20-60	Мужчины	14,7	23,1
	Женщины	3,7	5,7
0-100	Мужчины	12,4	19,5
	Женщины	3,2	5,1

Таблица 4.3.

**Коэффициенты дозового перехода при низких уровнях  
радиационного воздействия (однократное облучение  
5 мЗв и 1 WLM или пролонгированное облучение  
1 мЗв/год и 0,2 WLM/год)**

Возраст на момент облучения	Пол	Коэффициент дозового перехода	
		мЗв/WLM	нЗв/(Бк·ч·м <sup>3</sup> )
20	Мужчины	13,3	20,8
	Женщины	3,3	5,2
25	Мужчины	13,0	20,4
	Женщины	3,3	5,2
30	Мужчины	13,6	21,4
	Женщины	3,6	5,6
35	Мужчины	15,2	23,8
	Женщины	3,9	6,2
40	Мужчины	17,4	27,3
	Женщины	4,1	6,5
45	Мужчины	18,9	29,7
	Женщины	4,1	6,4
50	Мужчины	19,4	30,4
	Женщины	3,7	5,8
60	Мужчины	17,0	26,6
	Женщины	3,0	4,8
70	Мужчины	13,9	21,8
	Женщины	2,9	4,5
80	Мужчины	12,1	19,1
	Женщины	2,7	4,2
20-60	Мужчины	15,1	23,7
	Женщины	3,6	5,6
0-100	Мужчины	12,4	19,5
	Женщины	2,9	4,6

Результаты расчетов для модифицированных моделей радиационного риска при облучении радоном приведены в Табл. 4.4.

Таблица 4.4.

**Коэффициенты дозового перехода для общей популяции  
(однократное облучение 5 мЗв и 1 WLM или пролонгированное  
облучение 1 мЗв/год и 0,2 WLM/год)**

Возраст на момент облучения	Пол	Коэффициент дозового перехода	
		мЗв/WLM	нЗв/(Бк·ч·м <sup>3</sup> )
20	Мужчины	6,1	9,6
	Женщины	1,3	2,0
25	Мужчины	6,7	10,6
	Женщины	1,4	2,3
30	Мужчины	7,0	10,9
	Женщины	1,6	2,4
35	Мужчины	10,9	17,1
	Женщины	2,4	3,8
40	Мужчины	14,5	22,8
	Женщины	2,9	4,5
45	Мужчины	16,8	26,4
	Женщины	3,0	4,7
50	Мужчины	17,6	27,6
	Женщины	2,7	4,3
60	Мужчины	18,3	28,7
	Женщины	2,6	4,2
70	Мужчины	19,9	31,2
	Женщины	3,2	5,1
80	Мужчины	18,8	29,6
	Женщины	3,3	5,2
20-60	Мужчины	11,0	17,2
	Женщины	2,1	3,3
0-100	Мужчины	7,8	12,2
	Женщины	1,5	2,3

Коэффициент вариации для значений КДП, полученных попарной комбинацией различных моделей оценки риска, составил 0,53 для населения и 0,82 для шахтеров. При использовании метода условного

дозового перехода наблюдаются значительная разница в значениях КДП между мужчинами и женщинами. При использовании традиционных моделей, основанных на эпидемиологии шахтеров, отношение  $DCF_m / DCF_f$  лежит в диапазоне 4,0–5,7, а при использовании модифицированных моделей радиационного риска при облучении радоном диапазон значений данного отношения составил 4,5 – 7,0. Основными причинами столь существенных различий являются следующие факторы:

- радиационный ущерб для женщин при внешнем  $\gamma$ -облучении примерно в 1,5 раза выше, чем для мужчин;
- радиационный ущерб для мужчин при облучении радоном примерно в 3–4 раза выше по сравнению с женщинами вследствие значительной разницы в спонтанной частоте возникновения рака легкого.

Различные расчетные значения  $DCF_m$  и  $DCF_f$ , получающиеся в результате применения условного дозового перехода, естественно, могут представлять существенные проблемы при попытке использования их на практике.

В последние годы МКРЗ в своих материалах снова изменило свое отношение к подходам в отношении методов расчета эффективной дозы при облучении радоном. В заявлении по радону 2009 года Комиссия объявила, что при расчете поглощенных, эквивалентных и эффективных доз при облучении радоном следует давать предпочтение стандартным биокинетическим и дозиметрическим моделям. В первую очередь это было обусловлено развитием методов расчетов и существенным уточнением данных по биокинетике радионуклидов в организме человека.

В связи с этим в работе [22] были проведены оценки распределения КДП с использованием прямых дозиметрических расчетов. В качестве основы для анализа были использованы данные работ [36, 37], в которых были рассчитаны распределения поглощенных доз на отдельные регионы респираторного тракта при различных условиях. Расчет поглощенных доз на легкие производился методом Монте-Карло двух вариантов вклада различных отделов респираторного тракта в общую дозу облучения легкого [43]:

$$D = (0,5D_{BBbas} + 0,5D_{BBsec}) 0,333 + 0,333D_{bb} + 0,333D_{AI} \quad (4.12)$$

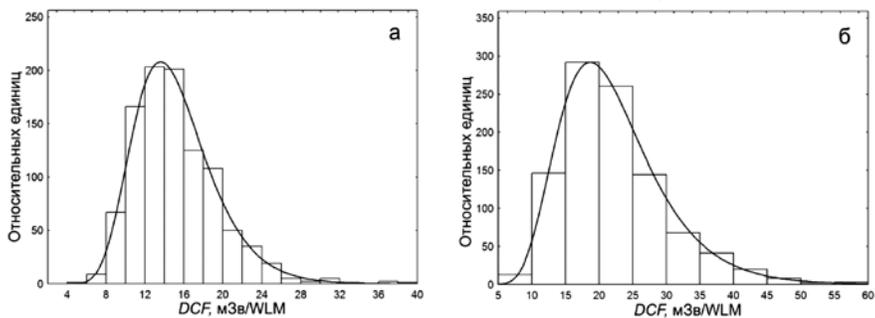
или

$$D = (0,5D_{BBbas} + 0,5D_{BBsec}) 0,80 + 0,15D_{bb} + 0,05D_{AI}, \quad (4.13)$$

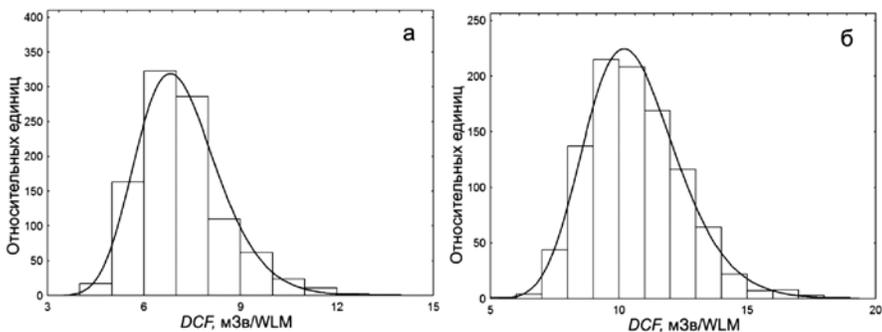
где  $D_{BBbas}$ ,  $D_{BBsec}$ ,  $D_{bb}$  и  $D_{AI}$  – поглощенные дозы на базальные и секреторные клетки бронхиального отдела, бронхиоларный и альвеолярный отделы, соответственно. Для перехода к эффективной дозе были использованы значения взвешивающих коэффициентов  $w_R=20$  и  $w_T=0,12$ . Результаты расчетов представлены на рис. 4.1 и 4.2. Различия в значениях дозовых коэффициентов между шахтами и жилищами в первую очередь обусловлены различиями в состоянии атмосферы (концентрация аэрозольных частиц, доля неприсоединенных атомов и т.д.), а также различиями в интенсивности дыхания на рабочих местах и в жилище.

В целом можно отметить, что между расчетами, выполненными при прямом использовании дозиметрических моделей респираторного тракта [38 – 41] и расчетами, выполненными с использованием условного дозового перехода на основе эпидемиологического подхода [40] наблюдается хорошее согласие, если сопоставление проводится только для мужчин, в особенности шахтеров. Подобные выводы были сделаны и Международной комиссией по радиологической защите на встрече в Сиднее в апреле 2015 года, где МКРЗ, основываясь на результатах оценок, выполненных обоими методами, рекомендовала использовать единое значение коэффициента дозового перехода КДП=12 мЗв/WLM для большинства ситуаций, связанных с облучением радоном [42].

Следует отметить, что данный коэффициент, соответствующий дозовому коэффициенту по ЭРОА 19 нЗв/(Бк·ч·м<sup>3</sup>) в три раза превышает коэффициент ранее рекомендованный Публикацией 65 МКРЗ и вдвое превышает коэффициент, рекомендованный НКДАР ООН и используемый в российской практике. Проблемы перехода на новые значения дозовых коэффициентов на настоящее время еще не решены как в России, так и в странах Европы.



**Рис. 4.1.** Коэффициенты дозового перехода от экспозиции по ДПП радона к эффективной дозе для атмосферы в шахте: а – расчет по уравнению (4.12), среднее 15,2 мЗв/WLM; б – расчет по уравнению (4.13), среднее 22,3 мЗв/WLM).



**Рис. 4.2.** Коэффициенты дозового перехода от экспозиции по ДПП радона к эффективной дозе для атмосферы в жилище: а – расчет по уравнению (4.12), среднее 7,2 мЗв/WLM; б – расчет по уравнению (4.13), среднее 10,7 мЗв/WLM).

### Литература

1. Рекомендации Международной комиссии по радиологической защите 1990 года. Публикация 60 МКРЗ // ICRP. – М.: Энергоатомиздат. – 1994. Ч.2.
2. Relative Biological Effectiveness (RBE), Quality Factor (Q), and Radiation Weighting Factor (wR). ICRP Publication 92. Ann. ICRP 33 (4). // ICRP. – 2003

3. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер с англ. / Под общей ред. *М.Ф. Киселёва и Н.К. Шандалы* // ICRP. – М.: Изд. ООО ПКФ «Алана». – 2009.
4. Human respiratory tract model for radiological protection. Annals of the ICRP 24 (1-3). ICRP publication 66 // ICRP. – Oxford: Pergamon Press. – 1994.
5. Защита от радона-222 в жилых зданиях и на рабочих местах. Публикация 65 МКРЗ // ICRP. – М.: Энергоатомиздат. – 1995.
6. Источники, эффекты и опасность ионизирующей радиации // Докл. НКДАР ООН за 1988 г. – М. – 1992. Т. 1.
7. Sources and effects of ionizing radiation. // United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1993 Report to the General Assembly, with scientific annexes. United Nations, New York. – 1993.
8. Источники и эффекты ионизирующего излучения // Отчет НКДАР ООН 2000 года с научными приложениями. – М. – 2002. Т. 1.
9. Радиационная защита на урановых и других рудниках. Публикация 24 МКРЗ // ICRP. – М.: Атомиздат. – 1979.
10. Риск заболевания раком легких от воздействия дочерних продуктов распада радона в помещениях. Публикация 50 МКРЗ // ICRP. – М.: Энергоатомиздат, 1992.
11. *Grosche B.* Lung cancer risk among German male uranium miners: a cohort study, 1946–1998 / *B. Grosche, M. Kreuzer, M. Kreisheimer, M. Schnelzer, A. Tschense* // Br. J. Cancer. – 2006. Vol. 95. – P. 1280–1287.
12. *Tomasek L.* Lung Cancer in French and Czech Uranium Miners: Radon-Associated Risk at Low Exposure Rates and Modifying Effects of Time since Exposure and Age at Exposure / *L. Tomasek, A. Rogel, M. Tirmarache, N. Mitton, D. Laurier* // Rad. Res. – 2008. Vol. 69. P. 125–137.
13. *Tomasek L.* Effect of age at exposure in 11 underground miners studies / *L. Tomasek* // Radiat. Prot. Dosim. – 2014. V. 160. – P. 120–123.
14. *Демин В.Ф.* Модифицированная модель оценки риска при ингаляционном поступлении радона / *В.Ф. Демин, М.В. Жуковский, С.И. Иванов, И.В. Ярмошенко* // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2011. Т.56, №5. – С. 21–30.
15. *Zhukovsky M.* The modified model of radiation risk at radon exposure / *В.Ф. Демин, М.В. Жуковский, С.И. Иванов, И.В. Ярмошенко* // Radiat. Prot. Dosim. – 2014. V. 160. – P. 134–137.

16. *Darby S.* Residential radon and lung cancer – detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14 208 persons without lung cancer from 13 epidemiological studies in Europe / *S. Darby, D. Hill, H. Deo* [et al]. // *Scand. J. Work Environ. Health.* – 2006. Vol. 32 (Suppl. 1). – P. 1–84.
17. *Krewski D.* A combined analysis of North American case–control studies of residential radon and lung cancer / *D. Krewski, J.H. Lubin, J.M. Zielinski* [et al] // *J. Toxicol. Environ. Health Part A.* – 2006. V. 69. – P. 533–597.
18. *Ozasa K.* Studies of the mortality of atomic bomb survivors, Report 14, 1950–2003: an overview of cancer and noncancer diseases / *K. Ozasa, Y. Shimizu, A. Suyama* [et al] // *Radiat Res.* – 2012. V. 177. – P. 229–243.
19. *Porstendorfer J.* Radon: measurements related to dose / *J. Porstendorfer* // *Environmental International.* – 1996. Vol. 22, Suppl. 1. – pp. S563–S583.
20. *Porstendorfer J.* Radon: characteristics in air and dose conversion factors / *J. Porstendorfer, A. Reineking* // *Health Physics.* 1999. Vol. 76 (3). – P. 300–305.
21. *Vargas A.* Dose Conversion Factor for Radon Concentration in Indoor Environment Using a New Equation for the F-fp Correlation / *A. Vargas, X. Ortega, M. Porta* // *Health Phys.* – 2000. V.78. – P. 80-85.
22. *Zhukovsky M.* Radon Exposure and Dose Calculation: Problems of Choice / *M. Zhukovsky, I. Yarmoshenko* // *Proc. Third International Conference on Radiation and Applications in Various Fields of Research, June 8-12, 2015, Budva, Montenegro.* – P. 343-348.
23. National Research Council. Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation // *BEIR VII Phase 2.* – Washington, DC: The National Academies Press. – 2006.
24. *Appendix A.* Epidemiological studies of radiation and cancer // *UNSCEAR.* – 2006.
25. *Preston D.L.* Studies of Mortality of Atomic Bomb Survivors. Report 13: Solid Cancer and Noncancer Disease Mortality: 1950–1997 / *D. L. Preston, Y. Shimizu, D. Pierce* [et al.] // *Radiation Research.* – 2003. V.160. – P. 381–407.
26. *Ozasa K.* et al. Studies of the Mortality of Atomic Bomb Survivors, Report 14, 1950–2003: An Overview of Cancer and Noncancer

- Diseases / *K. Ozasa, Y. Shimizu, A. Suyama* [et al.] // *Radiation Research*. – 2012. – pp. 177, 229–243.
27. *Richardson D.* Ionizing Radiation and Leukemia Mortality among Japanese Atomic Bomb Survivors, 1950–2000 / *D. Richardson, H. Sugiyama, N. Nishi* [et al.] // *Radiation Research*. – 2009. V.172. – P. 368–382.
  28. National Research Council. Health Risks of Exposure to Radon // BEIR VI. – Washington, DC: The National Academies Press. – 1999.
  29. *Walsh L.* The Influence of Radon Exposures on Lung Cancer Mortality in German Uranium Miners, 1946–2003 / *L. Walsh, A. Tschense, M. Schnelze* [et al.] // *Radiation Research*. – 2010. V.173. – P. 79–90.
  30. *Walsh L.* Differences in baseline lung cancer mortality between the German uranium miners cohort and the population of the former German Democratic Republic (1960–2003) / *L. Walsh, F. Dufey, M. Mohner* // *Radiat. Environ. Biophys.* – 2011. V.50. – P. 57–66.
  31. *Tomasek L.* Effect of age at exposure in 11 underground miners studies / *L. Tomasek* // *Radiat. Prot. Dosim.* – 2014. V. 160. – P. 120–123
  32. *Brugmans M.J.P.* Radon-induced lung cancer in French and Czech miner cohorts described with a two-mutation cancer model / *M.J.P. Brugmans, S.M. Rispens, H. Bijwaard* [et al.] // *Radiat. Environ. Biophys.* – 2004. V.43. – P. 153–163.
  33. *Van Dillen T.* Lung Cancer from Radon: A Two-Stage Model Analysis of the WISMUT Cohort, 1955–1998 / *T. Van Dillen, F. Dekkers, H. Bijwaard* [et al.] // *Radiation Research*. – 2011. V.175. – P. 119–130.
  34. *Lane R.S.D.* Mortality (1950–1999) and Cancer Incidence (1969–1999) in the Cohort of Eldorado Uranium Workers / *R.S.D. Lane, S.E. Frost, G.R. Howe* [et al.] // *Radiation Research*. – 2010 V. 174. – P. 773–785.
  35. EPA assessment of risks from radon in homes. Report EPA 402-R-03-003 // US Environmental Protection Agency. – Washington 2003.
  36. *Marsh J.W.* Uncertainty analysis of the absorbed dose to regions of the lung per unit exposure to radon progeny in a mine / *J.W. Marsh, A. Birchall* // Health Protection Agency. Chilton. Report HPA-RPD-054. – 2009.
  37. *Hofmann W.* Radon lung dosimetry models / *W. Hofmann, R. Winkler-Heil* // *Radiat. Prot. Dosim.* – 2011. V.145. – P. 206–212.

38. *Al-Jundi J.* Inhalation dose assessment of indoor radon progeny using biokinetic and dosimetric modeling and its application to Jordanian population / *J. Al-Jundi, W.B. Li, M. Abusini* [et al.] // *J Environ Radioact.* – 2011. V. 102. – P. 574-580.
39. *Brudecki K.* Age dependent inhalation doses to members of the public from indoor short-lived radon progeny / *K. Brudecki, W.B. Li, O. Meisenberg* // *Radiat Environ Biophys.* – 2014. V. 53. – P. 535-549.
40. *Harrison J.D.* Effective dose from inhaled radon and its progeny / *J.D. Harrison, J.W. Marsh* // *Proc. First ICRP Symposium on the International System of Radiological Protection. Ann. ICRP V. 41, No 3-4.* – p. 378-388.
41. *Marsh J.W.* Doses and lung cancer risks from exposure to radon and plutonium / *J.W. Marsh, J.D. Harrison, D. Laurier* [et al.] // *International Journal of Radiation Biology.* 2014. V. 90. – p. 1080–1087.
42. Summary of April 2015 Main Commission Meeting in Sydney Australia // ICRP. 2015, ICRP ref: 4821-2831-8499, <http://www.icrp.org/news.asp>.
43. *Zhukovsky M.* Relative biological effectiveness of alpha particles at radon exposure / *M. Zhukovsky, N. Bastrikova, A. Vasilyev* // *Radiation Protection Dosimerty.* – 2015. V.164. – P. 467 – 470.

*Приложение к главе 4*

## **Дозиметрическая модель респираторного тракта человека**

### **1. Анатомические данные**

Для анализа процессов, происходящих при ингаляционном поступлении радиоактивных аэрозолей в организм человека, рассмотрим вкратце модель респираторного тракта человека, предложенную МКРЗ (рис. П.1) [1–3]. Модификация модели респираторного тракта была сделана в Публикации МКРЗ 130 [4]. Основное внимание будет уделено вопросам, имеющим отношение к облучению легких при ингаляционном поступлении ДПР радона – процессам поведения аэрозольных частиц, содержащих преимущественно короткоживущие  $\alpha$ -излучающие радионуклиды. Вопросы ингаляци-

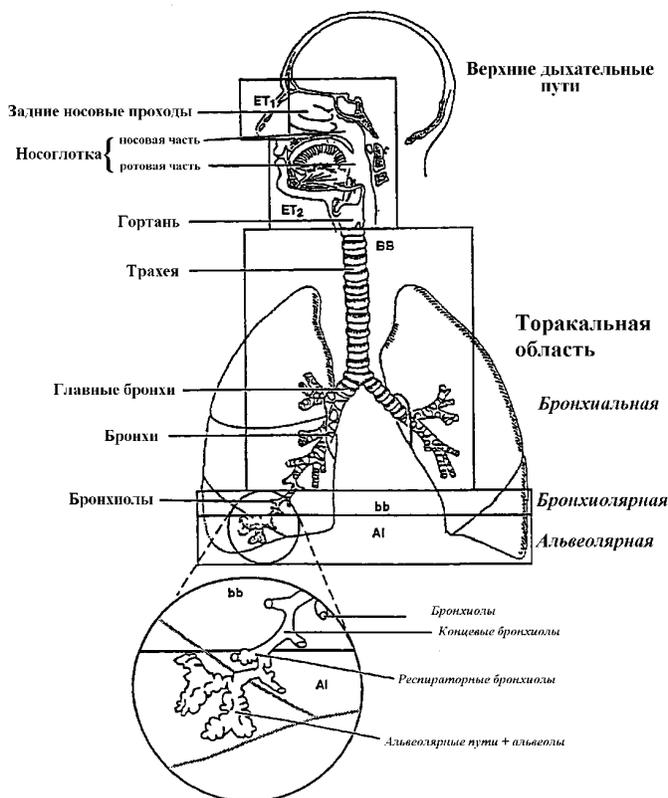
онного поступления радиоактивных газов и паров ( $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ , НТО, пары  $^{131}\text{I}$  и др), а также долгоживущих радионуклидов ( $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и др.) выходят за рамки данного обзора.

Условно модель респираторного тракта человека может быть разделена на две основных области – верхние дыхательные пути (extrathoracic airways – ET) и торакальную область (thoracic airways – TH). В свою очередь, в этих областях можно выделить отделы, отличающиеся анатомическим строением, физиологией, радиобиологическими свойствами, особенностями осаждения и выведения радионуклидов (рис. П.1). В верхних дыхательных путях можно выделить отдел  $\text{ET}_1$  – передние носовые проходы и отдел  $\text{ET}_2$ , в который входят задние носовые и ротовые проходы, глотка, гортань и соответствующие им лимфатические узлы ( $\text{LN}_{\text{ET}}$ ). В торакальной области можно выделить бронхиальный (BB) отдел, в который входит трахея и бронхиальные пути 1 – 8 порядка; бронхиолярный (bb) отдел – бронхиальные пути 9 – 15 порядка и альвеолярный (AI) отдел, в который входят воздушные пути 16-го порядка и выше, область газового обмена, а также соответствующие лимфатические узлы ( $\text{LN}_{\text{TH}}$ ).

Считается, что для альвеолярной области (AI) и лимфатических узлов ( $\text{LN}_{\text{ET}}$  и  $\text{LN}_{\text{TH}}$ ) клетки, подвергающиеся радиационному риску, распределены по всей области, в связи с чем рассчитывается средняя доза для заданной области. Вся масса данного отдела является тканью-мишенью. Для отделов, являющихся проводящими воздушными путями ( $\text{ET}_1$ ,  $\text{ET}_2$ , BB, bb), клетки мишени расположены в слое ткани на некоторой глубине под поверхностью дыхательных путей. Для верхних дыхательных путей ( $\text{ET}_1$ ,  $\text{ET}_2$ ) клетками-мишенями являются базальные клетки, для бронхиального отдела (BB) это как базальные, так и секреторные клетки, для бронхиолярного отдела – секреторные клетки.

В работах [1, 3] приведены параметры, характеризующие различные отделы респираторного тракта взрослого человека.

**Отдел  $\text{ET}_1$**  – эквивалентный средний диаметр воздушных проходов 5 мм, общая площадь поверхности 20 см<sup>2</sup>, средняя толщина плоскоклеточного эпителия 50 мкм, средняя глубина залегания ядер базальных клеток-мишеней 40–50 мкм.



*Рис. П.1. Модель респираторного тракта человека  
(Публикация 66 МКРЗ [1])*

**Отдел  $ET_2$**  – эквивалентный средний диаметр воздушных проходов 3 см, общая площадь поверхности 450 см<sup>2</sup>, средняя толщина слоистого плоскоклеточного эпителия 50 мкм, средняя глубина залегания ядер базальных клеток-мишеней 40–50 мкм, средняя толщина слизистого слоя 15 мкм.

**Отдел  $BB$**  – объем трахеи и бронхов  $5 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>, площадь бронхов 1–8 порядков 290 см<sup>2</sup>, средние параметры бронхиальных стенок: калибр 5 мм, толщина слизистого слоя 5 мкм, толщина слоя ресничек 6 мкм, толщина слоя эпителия (без учета ресничек) 55 мкм, глубина залегания ядер базальных клеток-мишеней 35–50 мкм, глубина залегания ядер секреторных клеток-мишеней 10–40 мкм.

**Отдел bb** – объем бронхиол  $5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$ , площадь бронхиол 9-15 порядков  $2400 \text{ см}^2$ , средние параметры бронхиолярных стенок: калибр 1 мм, толщина слизистого слоя 2 мкм, толщина слоя ресничек 4 мкм, толщина слоя эпителия (без учета ресничек) 15 мкм, глубина залегания ядер клеток-мишеней 4–12 мкм.

**Отдел AI** – общий объем респираторных бронхиол 16-26 порядков  $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ , общая площадь респираторных бронхиол  $7,5 \text{ м}^2$ , воздушный объем альвеол  $4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ , общая площадь поверхности альвеол  $140 \text{ м}^2$ .

Геометрические размеры трахеобронхиального дерева взрослого мужчины представлены в табл. П.1.

*Таблица П.1*

**Геометрические размеры трахеобронхиального дерева  
взрослого мужчины [3]**

Отдел	Порядок	Диаметр, м	Длина м	Угол ветвления, градус	Угол по отношению к силе тяжести
Бронхиальный (BB)	0 Трахея	$1,65 \cdot 10^{-2}$	$9,1 \cdot 10^{-2}$	0	0
	1 Главные бронхи	$1,20 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$	36	20
	2	$0,85 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	35	31
	3	$0,61 \cdot 10^{-2}$	$0,83 \cdot 10^{-2}$	28	43
	4	$0,44 \cdot 10^{-2}$	$0,90 \cdot 10^{-2}$	35	39
	5	$0,36 \cdot 10^{-2}$	$0,81 \cdot 10^{-2}$	39	39
	6	$0,29 \cdot 10^{-2}$	$0,66 \cdot 10^{-2}$	34	40
	7	$0,24 \cdot 10^{-2}$	$0,60 \cdot 10^{-2}$	48	36
	8	$0,20 \cdot 10^{-2}$	$0,53 \cdot 10^{-2}$	53	39
Бронхиолярный (bb)	9 Бронхиолы	$0,1651 \cdot 10^{-2}$	$0,4367 \cdot 10^{-2}$	54	45
	10	$0,1348 \cdot 10^{-2}$	$0,3620 \cdot 10^{-2}$	51	45
	11	$0,1092 \cdot 10^{-2}$	$0,3009 \cdot 10^{-2}$	46	45
	12	$0,0882 \cdot 10^{-2}$	$0,2500 \cdot 10^{-2}$	47	45
	13	$0,0720 \cdot 10^{-2}$	$0,2069 \cdot 10^{-2}$	48	45
	14	$0,0603 \cdot 10^{-2}$	$0,1700 \cdot 10^{-2}$	52	45
	15 Терминальные бронхиолы	$0,0533 \cdot 10^{-2}$	$0,1380 \cdot 10^{-2}$	45	45

Для оценки размеров отдельных элементов трахеобронхиального дерева для лиц с габаритами, отличающимися от габаритов «образцового человека» (табл. П.1) могут быть использованы масштабирующие коэффициенты (SF), связанные с ростом человека следующим соотношением:

$$SF = a (H_s - 1,76) + 1 , \quad (\text{П.1})$$

где  $H_s$  – рост человека, м. Численные значения коэффициентов  $a$ , используемых при вычислении масштабирующих коэффициентов приведены в табл. П.2. Считается, что развитие респираторного тракта детей заканчивается к возрасту 2 лет. В связи с этим считается, что размеры отделов респираторного тракта детей и подростков можно считать пропорциональными корню кубическому из функционального остаточного объема (FRC) легких [3].

*Таблица П.2*

**Численные значения коэффициентов  $a$ , используемых при вычислении масштабирующих коэффициентов [3]**

Порядок бронхов	Численное значение константы $a$	
	Расчет диаметра	Расчет длины
Трахея	0,540	0,559
Главные бронхи	0,530	0,468
Бронхи	0,507	0,474
Бронхи	0,489	0,502
Бронхи	0,429	0,431
Бронхи	0,441	0,476
Бронхи	0,452	0,441
Бронхи	0,405	0,359
Бронхи	0,333	0,273

Масса различных отделов респираторного тракта в зависимости от возраста и пола человека приведена в табл. П.3. В данной таблице через  $ВВ_{\text{sec}}$  обозначена масса бронхиального эпителия, в котором распределены ядра секреторных клеток, а через  $ВВ_{\text{bas}}$  – масса бронхиального эпителия, в котором распределены ядра базальных клеток. Для альвеолярного отдела (AI) в массу входит кровь, но не учитывается

масса лимфатических узлов. В модели респираторного тракта принимается, что масса лимфатической ткани одинакова для верхних дыхательных путей и торакальной области.

Таблица П.3

**Масса различных отделов респираторного тракта  
в зависимости от возраста и пола человека [3]**

Возраст	Масса, кг							
	ET <sub>1</sub>	ET <sub>2</sub>	BB <sub>sec</sub>	BB <sub>bas</sub>	bb	AI	LN <sub>ET</sub>	LN <sub>TH</sub>
Новорожденный	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$5,3 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$9,1 \cdot 10^{-5}$	$8,1 \cdot 10^{-5}$	0,052	$7,0 \cdot 10^{-4}$	$7,0 \cdot 10^{-4}$
3 месяца	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$6,3 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	0,090	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
1 год	$4,1 \cdot 10^{-6}$	$9,3 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	0,15	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$
5 лет	$8,3 \cdot 10^{-6}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$4,7 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$9,5 \cdot 10^{-4}$	0,30	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$
10 лет	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$6,2 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	0,50	$6,8 \cdot 10^{-3}$	$6,8 \cdot 10^{-3}$
15 лет (муж.)	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$8,2 \cdot 10^{-4}$	$4,1 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	0,86	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$
15 лет (жен.)	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$7,6 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	0,80	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$
Взрослые (муж.)	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$8,6 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	1,1	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$
Взрослые (жен.)	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$7,8 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	0,90	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$

## 2. Физиология респираторного тракта

В области физиологии респираторного тракта можно выделить две категории параметров. Первая категория – объемы легких в различных стадиях процесса дыхания. К ним относятся:

- общий объем легких (total lung capacity, TLC) – объем воздуха в легких при максимальном выдохе;
- функциональный остаточный объем (functional residual capacity, FRC) – объем воздуха, оставшийся в легких при нормальном выдохе;
- дыхательный объем легких (vital lung capacity, VC) – объем воздуха, поступающий в легкие при переходе от состояния

максимально возможного выдоха до состояния максимально возможного вдоха.

Ко второй категории параметров, описывающих физиологию респираторного тракта, относятся параметры вентиляции легких:

- вид дыхания – распределение вдыхаемого воздуха между носом и ртом;
- частота дыхания  $fR$  – количество вдохов в минуту;
- дыхательный объем  $VT$  (tidal volume) – объем вдыхаемого воздуха на один вдох.

Численные значения характерных для различного возраста респираторных объемов легких приведены в табл. П.4, характерные значения параметров вентиляции легких приведены в табл. П.5.

*Таблица П.4*

**Характерные для различного возраста  
респираторные объемы легких, л [3]**

	3 месяца	1 год	5 лет	10 лет	15 лет		Взрослые	
					Муж.	Жен.	Муж.	Жен.
TLC	0,28	0,55	1,6	2,9	5,4	4,5	7,0	5,0
FRC	0,15	0,24	0,77	1,5	2,7	2,3	3,3	2,7
VC	0,20	0,38	1,0	2,3	4,0	3,3	5,0	3,6

В зависимости от физиологических потребностей человек может дышать как через нос, так и через рот, либо использовать смешанный тип дыхания. В состоянии покоя для здоровых людей характерно носовое дыхание. В ситуациях, когда для человека с привычным носовым дыханием необходима высокая скорость дыхания (тяжелая физическая нагрузка), он может переключаться на ротоносовое дыхание, при котором аэродинамическое сопротивление воздушному потоку гораздо ниже. Вместе с тем имеются лица с привычным ротоносовым типом дыхания, что зачастую, обусловлено затруднениями в нормальном носовом дыхании. Доля от общего воздушного потока, проходящая через нос при различных режимах дыхания, приведена в табл. П.6.

Таблица П.5

**Характерные значения дыхательного объема легких  $V_T$ , л, скорости дыхания  $V$ , м<sup>3</sup>/ч и частоты дыхания  $f_R$ , мин<sup>-1</sup> [3]**

Параметры дыхания	Сон			Состояние покоя (сидя)			Легкая нагрузка			Тяжелая нагрузка		
	$V_T$	$V$	$f_R$	$V_T$	$V$	$f_R$	$V_T$	$V$	$f_R$	$V_T$	$V$	$f_R$
Возраст												
3 месяца	0,039	0,09	38	-	-	-	0,066	0,19	48	-	-	-
1 год	0,074	0,15	34	0,10	0,22	36	0,13	0,35	0,46	-	-	-
5 лет	0,17	0,24	23	0,21	0,32	25	0,24	0,57	39	-	-	-
10 лет												
мужчина	0,30	0,31	17	0,33	0,38	19	0,58	1,1	32	0,84	2,2	44
женщина	0,30	0,31	17	0,33	0,38	19	0,58	1,1	32	0,67	1,8	46
15 лет												
мужчина	0,50	0,42	14	0,53	0,48	15	1,0	1,4	23	1,4	2,9	36
женщина	0,42	0,35	14	0,42	0,40	16	0,90	1,3	24	1,1	2,6	38
Взрослые												
мужчина	0,63	0,45	12	0,75	0,54	12	1,3	1,5	20	1,9	3,0	26
женщина	0,44	0,32	12	0,46	0,39	14	0,99	1,3	21	1,4	2,7	33

Таблица П.6

**Доля от общего воздушного потока  $F_n$ , проходящая через нос при различных режимах дыхания [3]**

Уровень нагрузки	$F_n$	
	Нормальное носовое дыхание	Ротоносовой тип дыхания
Сон	1,0	0,7
Состояние покоя	1,0	0,7
Легкая нагрузка	1,0	0,4
Тяжелая нагрузка	0,5	0,3

В работе [3] приведены средние значения суточных объемов воздуха, потребляемых человеком в различном возрасте, основанные на возрастном распределении физической нагрузки и характерных значениях скорости дыхания (табл. П.7)

Таблица П.7

**Средние значения суточных объемов воздуха,  
потребляемых человеком в различном возрасте**

Уровень нагрузки	3 месяца		1 год		5 лет	
	Время, ч	Скорость дыхания, м <sup>3</sup> /ч	Время, ч	Скорость дыхания, м <sup>3</sup> /ч	Время, ч	Скорость дыхания, м <sup>3</sup> /ч
Сон	17	0,09	14	0,15	12	0,24
Состояние покоя	-	-	3,3	0,22	4,0	0,32
Легкая нагрузка	7	0,19	6,7	0,35	8	0,57
Тяжелая нагрузка	-	-	-	-	-	-
<b>Итого</b>		<b>2,8</b>		<b>5,1</b>		<b>8,8</b>
		10 лет		15 лет (мужчины)		15 лет (женщины)
Сон	10	0,31	10	0,42	10	0,35
Состояние покоя	4,7	0,38	5,5	0,48	7,0	0,40
Легкая нагрузка	9,3	1,1	7,5	1,38	6,8	1,3
Тяжелая нагрузка	-	-	1	2,92	0,25	2,6
<b>Итого</b>		<b>15,2</b>		<b>20,1</b>		<b>15,8</b>
		Взрослые (мужчины)		Взрослые (женщины)		
Сон	8	0,45	8,5	0,32		
Состояние покоя	6	0,54	5,4	0,39		
Легкая нагрузка	9,8	1,5	9,9	1,3		
Тяжелая нагрузка	0,25	3,0	0,19	2,7		
<b>Итого</b>		<b>22,2</b>		<b>18,2</b>		

### 3 Отложение аэрозолей в респираторном тракте

Остановимся на некоторых определениях, используемых при описании процесса ингаляционного загрязнения организма. **Поступление** (intake) – количество вещества, попавшее в организм при ингаляции через нос и рот. **Отложение** (deposition) – количество вещества (в долях от поступившего), которое остается в различных отделах дыхательного тракта после выдоха (иногда его называют мгновенным отложением). **Удержание** или задержка (retention) – количество вещества (в долях от поступившего), которое сохраняется в дыхательном тракте длительное время или даже постоянно.

Отложение аэрозолей – начальный процесс, определяющий количество радиоактивного материала в респираторном тракте после выдоха. Осаждение аэрозольных частиц может иметь место как при вдохе, так и при выдохе. Поведение аэрозольной частицы в респираторном тракте будет преимущественно определяться ее размерами, формой и плотностью. Наиболее значимый фактор, определяющий поведение аэрозольной частицы, – это ее размер.

В зависимости от размера аэрозольной частицы доминирующими процессами в ее осаждении на стенки респираторного тракта могут являться:

- гравитационное осаждение (седиментация);
- инерционное осаждение;
- диффузионное осаждение (броуновское движение).

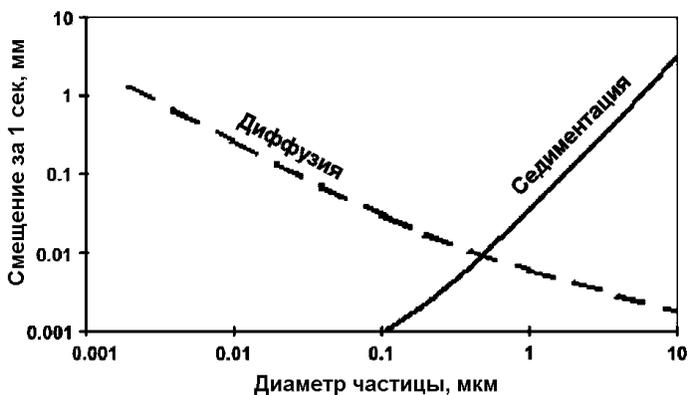
Схематично данные процессы изображены на рис. П.2. Седиментация и инерционное осаждение являются аэродинамическими эффектами, становятся значимыми при диаметре аэрозолей более 0,1 мкм и возрастают с увеличением диаметра аэрозолей. Диффузионное осаждение, обусловленное броуновским движением, является термодинамическим эффектом, проявляется при диаметре частиц менее 1 мкм и становится более выраженным по мере уменьшения диаметра аэрозолей.

Схематичное сопоставление гравитационного и диффузионного осаждения представлено на рис. П.3. Для гравитационного осаждения (седиментации) под смещением подразумевается вертикальное

смещение частицы под действием силы тяжести. Для диффузионного осаждения под смещением понимается корень квадратный из среднего квадрата расстояния, пройденного частицей под действием броуновского движения.



*Рис. П.2. Доминирующие процессы при осаждении аэрозолей в респираторном тракте [2]*



*Рис. П.3. Схематичное сопоставление гравитационного и диффузионного осаждения [2]*

Из представленного схематического сопоставления видно, что аэродинамические эффекты пренебрежимо малы для аэрозолей с малым диаметром. Аналогично для частиц с достаточно большими размерами влияние термодинамических эффектов пренебрежимо мало.

Для аэрозолей диаметром от 0,1 до 1,0 мкм наблюдается сопоставимое влияние термодинамических и аэродинамических эффектов на процессы осаждения.

Дисперсность аэрозольных частиц во вдыхаемом воздухе может быть различной – от тысячных долей микрона до десятков микрон. Для размера радиоактивных аэрозолей имеет значение характер их образования. При коагуляции активность аэрозольных частиц прямо пропорциональна их радиусу. Если частицы абсорбируются на субмикроскопических пылинках, то активность каждой пылинки пропорциональна ее поверхности. При распылении твердого или жидкого радиоактивного вещества активность обычно пропорциональна объему пылинки. В реальных условиях часто приходится иметь дело с полидисперсными аэрозолями, где не всегда объем частицы характеризует ее активность. В этом случае для оценки биологического эффекта – задержки частиц в органах дыхания и облучения легочной ткани – важное значение имеет не счетный медианный диаметр (СМАД) или массовый медианный аэродинамический диаметр (ММАД), а медианный аэродинамический диаметр распределения аэрозолей по активности (АМАД) или медианный по активности термодинамический диаметр (АМТД).

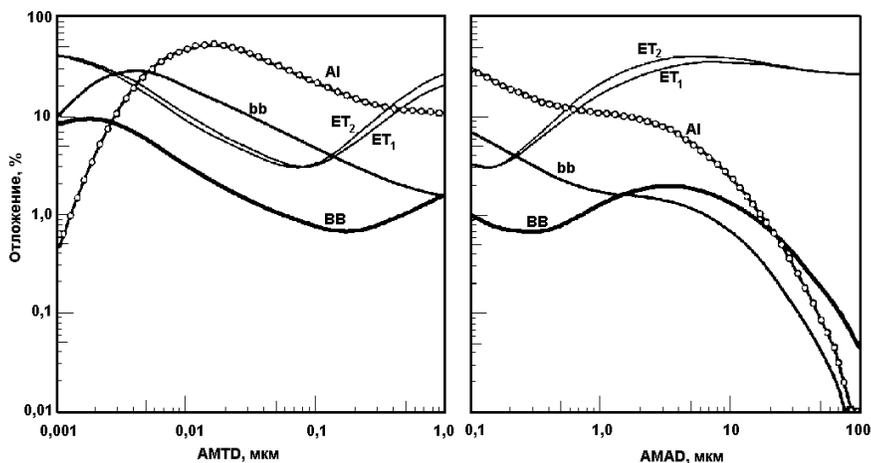
**Медианный по активности аэродинамический диаметр (АМАД)** – характеристика статистического распределения активности полидисперсного аэрозоля по аэродинамическому диаметру  $d_{ae}$ . Половина активности рассматриваемого аэрозоля ассоциирована с частицами, которые имеют  $d_{ae}$  больший, чем АМАД. Применяется, когда доминирующими механизмами, определяющими отложение в органах дыхания, является инерционное и гравитационное осаждение, как правило, при АМАД, больших 0,5 мкм. При отсутствии фактических данных предполагается логнормальное распределение частиц.

**Медианный по активности термодинамический диаметр (АМТД)** – характеристика статистического распределения активности полидисперсного аэрозоля по термодинамическому диаметру  $d_{th}$ . Половина рассматриваемой активности ассоциирована с частицами, которые имеют  $d_{th}$  больший, чем АМТД. Применяется, когда диффузия является доминирующим механизмом, определяющим отложение в дыхательной системе, как правило, при АМТД, меньших 0,5 мкм.

**Аэродинамический диаметр ( $d_{ac}$ )** – диаметр сферической частицы единичной плотности ( $1 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ ), имеющий такую же скорость гравитационного осаждения, как и рассматриваемая аэрозольная частица.

**Термодинамический диаметр ( $d_{th}$ )** – диаметр сферической частицы, который имеет такой же коэффициент диффузии в воздухе, что и рассматриваемая аэрозольная частица.

Исходя из геометрических размеров различных отделов респираторного тракта, типов и режимов дыхания, было рассчитано отложение радиоактивных аэрозолей в различных отделах респираторного тракта в зависимости от размеров аэрозольных частиц. Полностью справочные таблицы по отложению аэрозолей приведены в работах [1, 2]. Пример такого расчета представлен на рис. П.4. Следует обратить внимание на различное положение кривых в диапазоне AMAD и AMTD от 0,1 до 1,0 мкм – аэрозоли с плотностью большей, чем  $1 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$  будут иметь большее значение AMAD, чем AMTD при одинаковом отложении в отделах респираторного тракта.



*Рис. П.4. Отложение радиоактивных аэрозолей в различных отделах респираторного тракта для «образцового работника» при носовом типе дыхания [1]. Принята плотность вещества  $3 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ , логнормальное распределение активности по размерам аэрозолей и динамический форм-фактор частицы, равный 1,5.*

#### 4. Выведение из респираторного тракта

Аэрозольные частицы, попавшие в респираторный тракт в процессе дыхания, не могут находиться в нем неограниченно долго. За счет физико-химических и физиологических процессов, протекающих в респираторном тракте человека, поступившие аэрозоли могут быть выведены в окружающую среду, желудочно-кишечный тракт, лимфатические узлы либо раствориться и перейти в жидкости организма (рис. П.5).

При создании модели выведения из респираторного тракта были приняты следующие упрощения [1, 2]:

- все скорости выведения не зависят от возраста и пола;
- скорости выведения, обусловленные переносом частиц и всасыванием в жидкости организма, являются независимыми;
- скорость выведения частиц из носовой полости и скорости переноса частиц в желудочно-кишечный тракт и лимфатические узлы одинаковы для всех веществ;
- всасывание в жидкости организма зависит от физической и химической формы осажденного вещества, но происходит с одинаковой скоростью во всем респираторном тракте, включая лимфатические узлы (за исключением отдела ЕТ<sub>1</sub>, где всасывание отсутствует).

Выведение осевших в респираторном тракте аэрозольных частиц в основном осуществляется за счет действия ресничек мерцательного эпителия, выстилающего стенки дыхательных путей. Реснички мерцательного эпителия колеблются против движения вдыхаемого воздуха, удаляя в желудочно-кишечный тракт вместе со слизью осевшие на стенках респираторного тракта частицы. Схематично удаление частиц из респираторного тракта можно представить в виде схемы, изображенной на рис. П.6. Представленная схема относится только к выведению частиц и не учитывает растворение и всасывание в респираторном тракте.

На схеме цифрами указаны постоянные времени выведения, сут<sup>-1</sup>, частиц из одного отдела респираторного тракта в другой. При этом учитывается, что различные доли аэрозолей, поступивших в

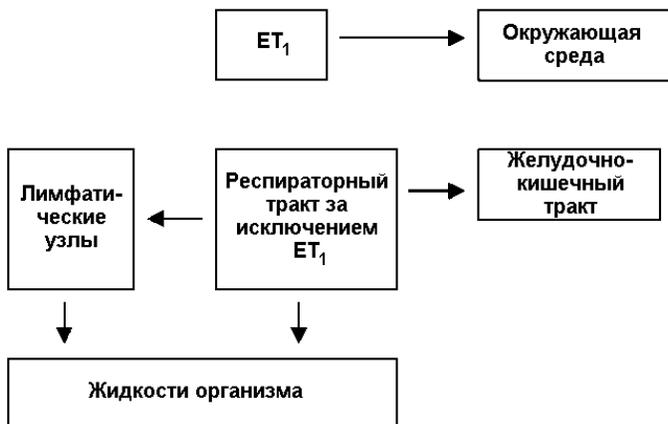


Рис. П.5. Пути выведения из респираторного тракта человека

тот или иной отдел респираторного тракта (BB, bb, AI) выводятся с различными постоянными времени. Доля распределения аэрозолей между различными компартаментами отделов респираторного тракта представлена в табл. П.8.



Рис. П.6. Схема выведения частиц из респираторного тракта [4]

Таблица П.8

Доля распределения аэрозолей между различными компартментами отделов респираторного тракта [4]

Отдел респираторного тракта	Компартмент	Отложение в компартменте в долях от поступления в отдел
ET2	ET <sub>2</sub>	0,998
	ET <sub>seq</sub>	0,02
BB	BB <sub>1</sub>	0,998
	BB <sub>seq</sub>	0,02
bb	bb <sub>1</sub>	0,998
	bb <sub>seq</sub>	0,02

Кроме выведения аэрозольных частиц из респираторного тракта за счет действия мерцательного эпителия необходимо рассматривать растворение вещества, из которого состоят отложившиеся частицы, и его переход в жидкости организма. Схематично данный процесс изображен на рис. П.7.

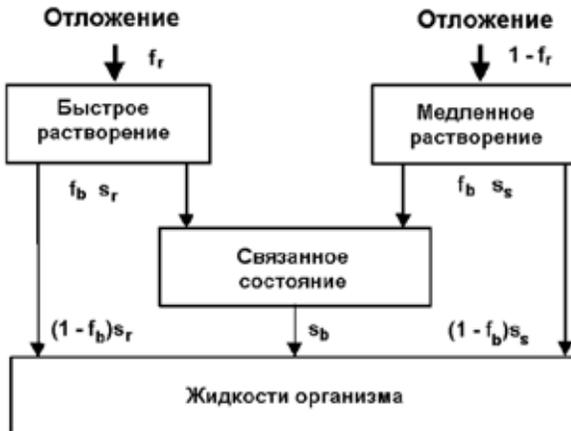


Рис. П.7. Схемы растворения отложившихся в респираторном тракте аэрозольных частиц [2, 4]

Схема, соответствующая рис. П.7, учитывает, что часть  $f_r$  поступившего в респираторный тракт вещество может находиться в быстрорастворимом состоянии, а доля  $(1-f_r)$  будет растворяться в организме с медленной скоростью.

Поступившие в респираторный тракт в виде аэрозолей вещества могут находиться в различных химических формах и иметь различную растворимость. Для учета различной растворимости веществ в респираторном тракте их условно разделяют на три типа веществ при ингаляционном поступлении: быстрорастворимые вещества – тип Б; вещества с промежуточной скоростью растворения – тип П; вещества с медленной скоростью растворения – М. В англоязычной литературе этим типам веществ соответствуют обозначения F (fast), M (medium) и S (slow). Численные значения параметров модели, приведенной на рис. П.8, принимаемых по умолчанию, представлены в табл. П.9. Для тех элементов, для которых имеются более подробные данные по растворимости в респираторном тракте в Публикации МКРЗ 130 рекомендовано использование параметров растворимости, специфичных для данного элемента.

*Таблица П.9.*

**Численные значения параметров, описывающих растворение отложившихся веществ в респираторном тракте [4]**

Тип вещества		Б(F)	П(M)	М(S)
Доля быстрорастворимой фракции	$f_r$	1,0	0,2	0,01
Скорость растворения:				
быстрого (сут <sup>-1</sup> )	$s_r$	30	3	3
медленного (сут <sup>-1</sup> )	$s_s$	-	0,005	0,0001

В предварительном варианте третьей части Публикации МКРЗ, посвященной профессиональному внутреннему облучению [5] были опубликованы параметры растворимости ДПР радона – полония, свинца и висмута (табл. П.10).

**Параметры растворимости ДПР радона  
в респираторном тракте**

Элемент	Параметр				
	$f_r$	$f_b$	$s_r$ (сут <sup>-1</sup> )	$s_s$ (сут <sup>-1</sup> )	$s_b$ (сут <sup>-1</sup> )
Полоний	0,2	0	3	0,005	–
Свинец	0,1	0,5	100	1,7	1,7
Висмут	1	0	1	–	–

В результате поведение радионуклидов в респираторном тракте человека может быть описано при помощи достаточно громоздкой системы дифференциальных уравнений первого порядка, учитывающей перераспределение радионуклидов между отделами респираторного тракта, их всасывание в жидкости организма и радиоактивный распад. Для каждого из компартментов, представленных на рис. П.6, динамика изменения активности может быть представлена дифференциальными уравнениями, описывающими изменение активности отложившегося вещества, находящегося как в быстрорастворимом и медленно растворимом состоянии.

В Публикации 66 МКРЗ отмечается, что в случае наличия цепочки радиоактивного распада скорость диссоциации отложившейся аэрозольной частицы в основном определяется ее составом и будет одинаковой как для материнского радионуклида, так и для его дочерних продуктов распада [1]. Поэтому значения  $s_r$  и  $s_s$  часто принимаются одинаковыми как для материнского радионуклида, так и для его продуктов распада. Исключение может представлять случай, когда продукт распада является благородным газом, таким, как радон. Вместе с тем отмечается, что для растворенного вещества не обязательно, что численные значения  $f_b$  и  $s_b$  для материнского и дочерних радионуклидов будут иметь одинаковые значения.

Рассмотрим для примера уравнения, описывающие изменение активности радионуклидов А в бронхиальной области (ВВ) респираторного тракта

Введем обозначение для частиц в быстрорастворимом состоянии индекс  $r$  и, а для частиц в медленно растворимом состоянии – индекс  $s$ . Тогда можно записать следующие уравнения (представим их только для отдела ВВ при отсутствии связанного состояния).

$$\frac{dA_{BB}}{dt} = \frac{dA_{BB}^r}{dt} + \frac{dA_{BB}^s}{dt}, \quad (\text{П.2})$$

$$\frac{dA_{BB}^r}{dt} = f_r \frac{dA_{BB}^{dep}(t)}{dt} - \lambda \cdot A_{BB}^r - (s_r + 10) \cdot A_{BB}^r + 0,2 \cdot A_{bb}^r \quad (\text{П.3})$$

$$\frac{dA_{BB}^s}{dt} = (1 - f_r) \frac{dA_{BB}^{dep}(t)}{dt} - \lambda \cdot A_{BB}^s - (s_s + 10) \cdot A_{BB}^s + 0,2 \cdot A_{bb}^s, \quad (\text{П.4})$$

где  $\frac{dA_{BB}^{dep}(t)}{dt}$  – скорость отложения вещества в отделе ВВ,  $\lambda$  – постоянная распада радионуклида.

## 5. Расчет доз на отделы респираторного тракта при ингаляционном поступлении радионуклидов

Цель дозиметрической модели респираторного тракта – определение доз облучения каждой из шести тканей респираторного тракта:

- эпителий кожи внешних носовых проходов (отдел  $ET_1$ );
- слоистый плоскоклеточный эпителий основных воздушных проходов верхних дыхательных путей (отдел  $ET_2$ );
- ресничный эпителий бронхов (отдел ВВ);
- ресничный эпителий бронхиол (отдел bb);
- альвеолярная ткань (отдел AI);
- лимфатические узлы верхних дыхательных путей и торакальной области (отделы  $LN_{ET}$  и  $LN_{TH}$ )

Для расчета эквивалентных доз (взвешенных по излучению доз) на органы и ткани человека при внутреннем облучении используется понятие «удельная эффективная энергия». Удельная эффектив-

ная энергия  $Y\bar{E}\bar{E}(T\leftarrow S; t)$  – энергия, поглощенная в единице массы органа-мишени  $T$  при единичном ядерном превращении в органе-источнике  $S$  [6].

Данная величина зависит от типа радионуклида, взаимного расположения органа-источника и органа-мишени и природы ткани, расположенной между ними. Поскольку масса органов и тканей человека и расстояние между ними зависят от возраста человека ( $t$ ), то величина  $Y\bar{E}\bar{E}(T\leftarrow S; t)$  рассчитывается для нескольких возрастных групп.

$$Y\bar{E}\bar{E}(T\leftarrow S; t) = \frac{1}{M_T(t)} \sum_i Y_i \cdot E_i \cdot AF_i(T\leftarrow S; t), \quad (\text{П.5})$$

где  $M_T(t)$  – масса органа-мишени в возрасте  $t$ ;  $Y_i$  – выход излучения вида  $i$  на одно ядерное превращение;  $E_i$  – энергия  $\alpha$ -частицы или  $\gamma$ -кванта вида  $i$ ;  $AF_i(T\leftarrow S; t)$  – доля энергии излучения вида  $i$ , которая поглотится в органе-мишени  $T$  при распаде радионуклида в органе-источнике  $S$ .

Величина  $SAF_i(T\leftarrow S; t) = AF_i(T\leftarrow S; t) / M_T(t)$  носит название удельной поглощенной доли энергии. Размерность  $SAF_i(T\leftarrow S; t)$  –  $\text{кг}^{-1}$ .

Ожидаемая эквивалентная доза облучения органа-мишени  $T$  на возраст  $t$  при поступлении в организм в возрасте  $t_0$  радионуклида рассчитывается из следующего выражения

$$H(t_0, t) = \int_{t_0}^t \dot{H}(t') dt' = \int_{t_0}^t c \sum_s \sum_j w_{R,j} A_{sj}(t') \cdot Y\bar{E}\bar{E}_{sj}(T\leftarrow S; t') dt', \quad (\text{П.6})$$

где  $A_{sj}(t)$  – активность радионуклида  $j$  в органе  $S$  в момент времени  $t'$  после поступления радионуклида в кровь в возрасте  $t_0$ ;  $c$  – коэффициент пропорциональности;  $w_{R,j}$  – взвешивающий коэффициент излучения для радионуклида  $j$ . Основную сложность в проведении расчетов эквивалентной дозы представляет определение величины  $SAF_i(T\leftarrow S; t)$  для различных видов излучения.

В данной работе, где основной интерес представляет облучение легочной ткани излучением дочерних продуктов распада изотопов радона, мы рассмотрим определение поглощенной доли энергии только

для короткопробежного  $\alpha$ -излучения. Методы расчета удельной поглощенной доли энергии для  $\gamma$ -излучающих радионуклидов подробно представлены в работе [6].

При оценке доз облучения на чувствительные клетки-мишени различных отделов респираторного тракта необходимо учитывать неоднородное распределение радионуклидов по глубине их проникновения в стенки дыхательных путей. Можно выделить несколько типов источников, имеющих различное положение относительно клеток мишеней:

1. поверхностный перенос радионуклидов, включающий в себя радионуклиды, находящиеся на поверхности эпителиальной ткани, переносимые со слизью или другими жидкостями через бронхиолы, бронхи и трахею, либо радионуклиды, ожидающие своего удаления с поверхности кожи внешних носовых проходов;
2. секвестрированные в ткань радионуклиды представляют собой неизмененные частицы, удерживаемые стенками воздушных путей;
3. радионуклиды, всасывающиеся из респираторного тракта в кровь.

Рассмотрим особенности распределения источников излучения в различных отделах респираторного тракта [1,4].

**Верхние дыхательные пути (ЕТ).** Стенки отдела ЕТ<sub>1</sub> (внешние носовые проходы) выстланы кератинизированным плоскоклеточным эпителием. В этом отделе источник радионуклидов локализован исключительно на поверхности кожи, которая считается непроницаемой для всасывания радионуклидов и секвестрирования частиц. Поскольку на поверхности кожи отсутствует поверхностная жидкость, то поглощение энергии излучения в самом источнике отсутствует. Мишенями в этом отделе являются ядра базальных клеток, равномерно распределенные в слое толщиной 10 мкм на глубине 40 мкм.

Для отдела ЕТ<sub>2</sub> можно выделить три основных области, в которых могут быть распределены радионуклиды.

1. Слизистый слой на поверхности эпителия, где считается,

что концентрация радионуклидов равномерно распределена в слое толщиной 15 мкм. На рис. П.6 данный источник соответствует компартменту с быстрым поверхностным переносом  $ET'_2$ .

2. Частицы, секвестрированные макрофагами в слое *lamina propria* для которых принимается, что радионуклиды равномерно распределены в слое толщиной 10 мкм на глубине 55 мкм. Данный источник соответствует компартменту  $ET_{seq}$ .
3. Вещество в химически связанном со слоем эпителия состоянии, равномерно распределенное в слое эпителия до глубины 55 мкм.

Как и в отделе  $ET_1$ , в отделе  $ET_2$  мишенями являются ядра базальных клеток, равномерно распределенных на глубине 40 мкм в слое толщиной 10 мкм. Средняя доля поглощенной энергии в слое ткани, содержащем ядра базальных клеток, была рассчитана в работе [1] в предположении, что все отделы верхних дыхательных путей имеют свой характерный внутренний диаметр. Для отдела  $ET_1$  при расчетах внутренний диаметр был принят равным 5 мм, а для отдела  $ET_2$  – 30 мм. Отмечается, что неопределенности оценок, обусловленные отклонением от простой цилиндрической геометрии, принятой при расчетах, не превышают 50%. Существенно более критичным параметром является расположение тканей-мишеней в слое эпителия.

**Бронхиальный отдел (ВВ).** Как уже отмечалось ранее, в бронхиальном отделе легких мишенями являются ядра как секреторных, так и базальных клеток. Считается, что секреторные клетки равномерно распределены в слое ткани на глубине 10 мкм толщиной 30 мкм. Толщина слоя базальных клеток составляет 15 мкм, глубина залегания – 35 мкм.

В модели принято, что популяции секреторных и базальных клеток имеют одинаковую чувствительность к ионизирующему излучению. Общий риск принимается обусловленным взвешенной средней дозой между популяциями этих клеток-мишеней. Считается, что бронхиальный эпителий защищен от  $\alpha$ -излучения, испускаемого

в альвеолярном отделе AI (и наоборот) слоем соединительной ткани толщиной 500 мкм. Для  $\beta$ -излучения со значительной энергией толщина данной защиты недостаточна.

Для бронхиального отдела легких можно рассмотреть пять основных источников радионуклидов.

1. Слой слизи (геля), покрывающий реснички на поверхности эпителия, для которого считается, что радионуклиды равномерно распределены в слое толщиной 5 мкм. Данный источник соответствует компартменту с быстрым поверхностным переносом  $BB_1$  (рис. П.6).
2. Слой слизи (золя), в котором находятся реснички мерцательного эпителия. Радионуклиды равномерно распределены в слое толщиной 6 мкм. Данный источник соответствует компартменту с медленным поверхностным переносом  $BB_2$ .
3. Частицы, секвестрированные макрофагами в слое *lamina propria*, для которых принимается, что радионуклиды равномерно распределены в слое толщиной 10 мкм на глубине 60 мкм. Данный источник соответствует компартменту  $BB_{seq}$ .
4. Вещество в химически связанном состоянии в стенках бронхиального отдела, равномерно распределенное в слое эпителия до глубины 60 мкм.
5. Источники  $\beta$ -излучения с высокой энергией, расположенные в альвеолярном отделе легких.

При расчетах поглощенной доли энергии средний калибр бронхиальных путей принимался равным 5 мм [1].

**Бронхиолярный отдел (bb).** Для бронхиолярного отдела мишени – ядра секреторных клеток равномерно распределены в слое ткани толщиной 8 мкм, расположенном на глубине 4 мкм. Толщина соединительной ткани в бронхиолярном отделе значительно ниже, чем в бронхиальном и составляет около 20 мкм. В связи с этим возможно облучение бронхиолярного отдела за счет как  $\alpha$ -, так и  $\beta$ -излучающих радионуклидов, находящихся в альвеолярном отделе легких.

Как для бронхиального отдела, так и для бронхиолярного от-

дела легких можно рассмотреть пять основных источников радионуклидов.

1. Слой слизи (геля), покрывающий реснички на поверхности эпителия, для которого считается, что радионуклиды равномерно распределены в слое толщиной 2 мкм. Данный источник соответствует компартменту  $bb_1$ .
2. Слой слизи (золя), в котором находятся реснички мерцательного эпителия. Радионуклиды равномерно распределены в слое толщиной 4 мкм. Данный источник соответствует компартменту  $bb_2$ .
3. Частицы, секвестрированные макрофагами, для которых принимается, что радионуклиды равномерно распределены в слое толщиной 5 мкм, расположенном на глубине 20 мкм. Данный источник соответствует компартменту  $bb_{seq}$ .
4. Вещество в химически связанном состоянии в стенках бронхиолярного отдела, равномерно распределенное в слое эпителия до глубины 20 мкм.
5. Источники  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучения, расположенные в альвеолярном отделе легких.

При расчетах поглощенной доли энергии средний калибр бронхиальных путей принимался равным 1 мм [1].

**Альвеолярный отдел (AI).** В альвеолярном отделе легочная ткань, а также стенки кровеносных и лимфатических капилляров достаточно тонки для того, чтобы можно было считать, что чувствительные к излучению клетки-мишени распределены равномерно. В связи с этим можно считать, что средние дозы, полученные клетками-мишенями, равны дозам, полученным тканью альвеолярного отдела в целом [1]. Для короткопробежного излучения ( $\alpha$ -частицы и  $\beta$ -излучение с относительно невысокой энергией) можно считать, что поглощенная доля энергии  $AF(AI \leftarrow AI) = 1$ .

Для короткопробежного излучения радионуклидов, локализованных в бронхиальном и бронхиолярном отделах легких, его вклад в формирование дозы в альвеолярном отделе легких пренебрежимо

мал. Поэтому с достаточной точностью считается, что

$$AF(AI \leftarrow BB) = AF(AI \leftarrow bb) = 0 . \quad (\text{П.7})$$

**Лимфатические узлы ( $LN_{ET}$  и  $LN_{TH}$ ).** Поскольку источники излучения и клетки-мишени равномерно распределены по ткани лимфатических узлов, то для  $\alpha$ -излучения принято, что

$$AF(LN_{ET} \leftarrow LN_{ET})_{\alpha} = AF(LN_{TH} \leftarrow LN_{TH})_{\alpha} = 1 . \quad (\text{П.8})$$

Для лимфатических узлов, расположенных в торакальной области, возможен выход  $\beta$ -частиц из лимфатических узлов и их поглощение в альвеолярном отделе легких. В связи с этим в работе [1] принято, что

$$AF(LN_{TH} \leftarrow LN_{TH})_{\beta} = AF(AI \leftarrow LN_{TH})_{\beta} = 0,5 . \quad (\text{П.9})$$

Для всех остальных органов и тканей считается, что

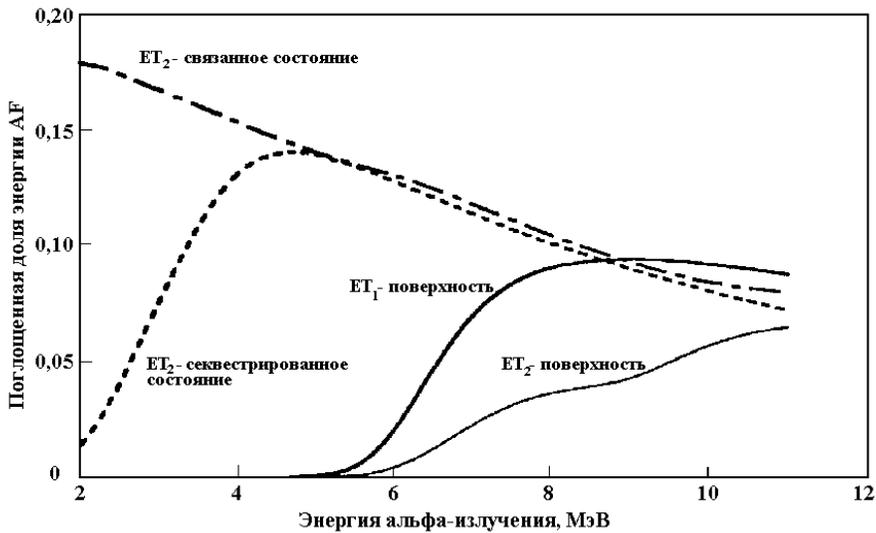
$$AF(T \leftarrow LN_{TH})_{\beta} = AF(T \leftarrow LN_{ET})_{\beta} = 0 . \quad (\text{П.10})$$

Аналогично, для  $\alpha$ -излучающих радионуклидов

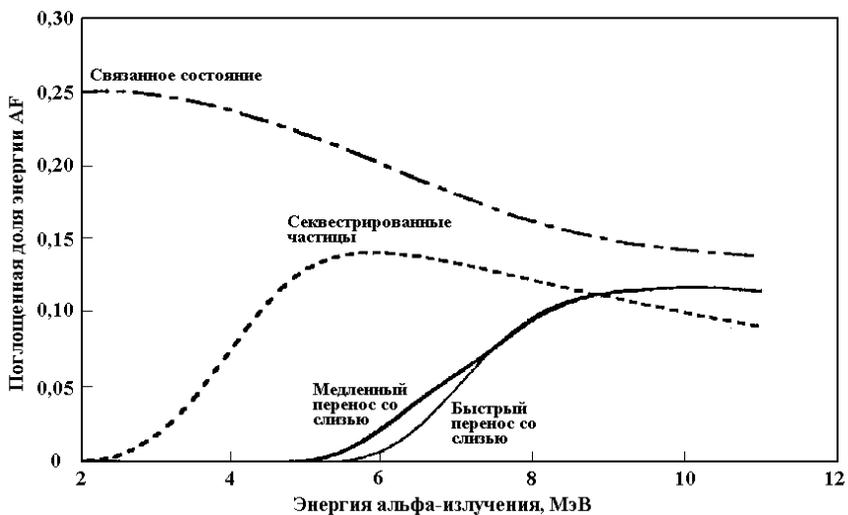
$$AF(T \leftarrow LN_{TH})_{\alpha} = AF(T \leftarrow LN_{ET})_{\alpha} = 0 . \quad (\text{П.11})$$

В Публикации 66 МКРЗ [1] отмечается, что для короткопробежного излучения при определении поглощенной доли энергии калибр дыхательных путей (табл. П.1) играет второстепенную роль. В первую очередь численное значение  $AF$  определяется толщиной источника и мишени, а также их пространственным расположением. Толщина легочного эпителия, а также слизистого слоя в основном обусловлена их функциональным назначением, а не возрастом человека или его габаритами. В связи с этим считается [1], что поглощенные доли энергии в респираторном тракте независимы от возраста человека и его размеров.

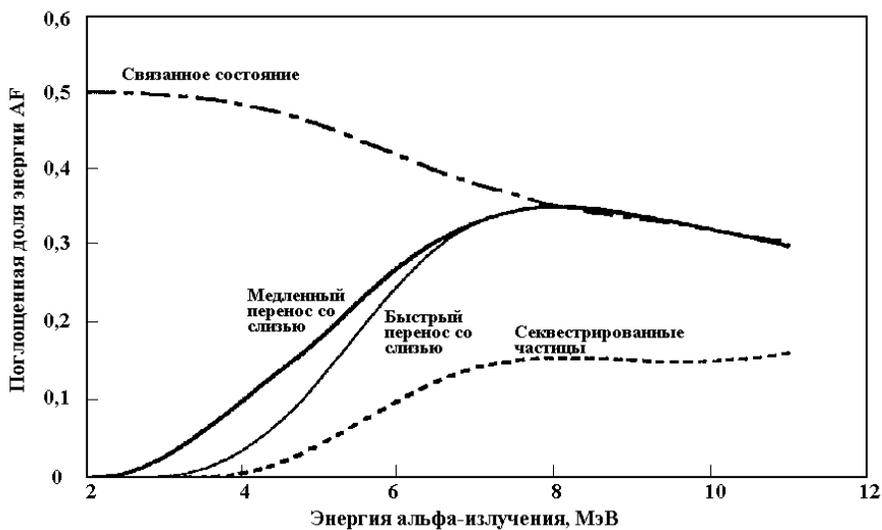
Поглощенные доли энергии в различных отделах респираторного тракта для  $\alpha$ -излучения приведены на рис. П.8 – П.12.



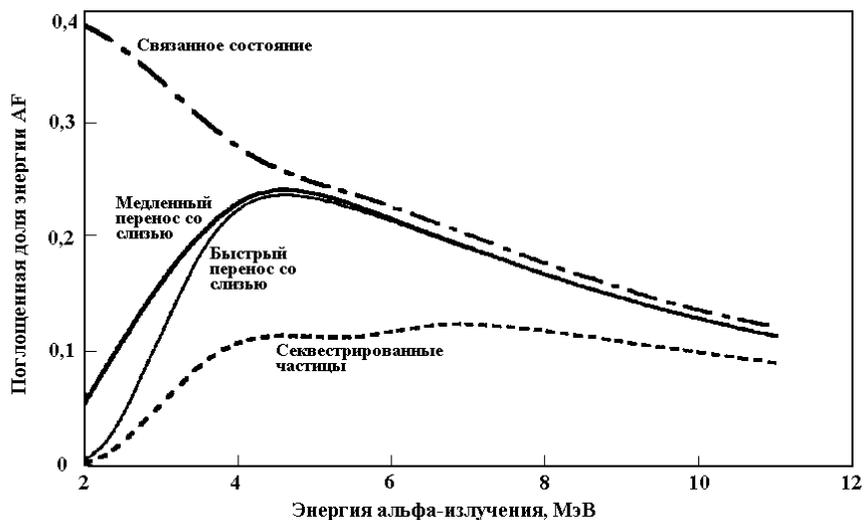
*Рис. П.8. Поглощенная доля энергии альфа-излучения для верхних дыхательных путей*



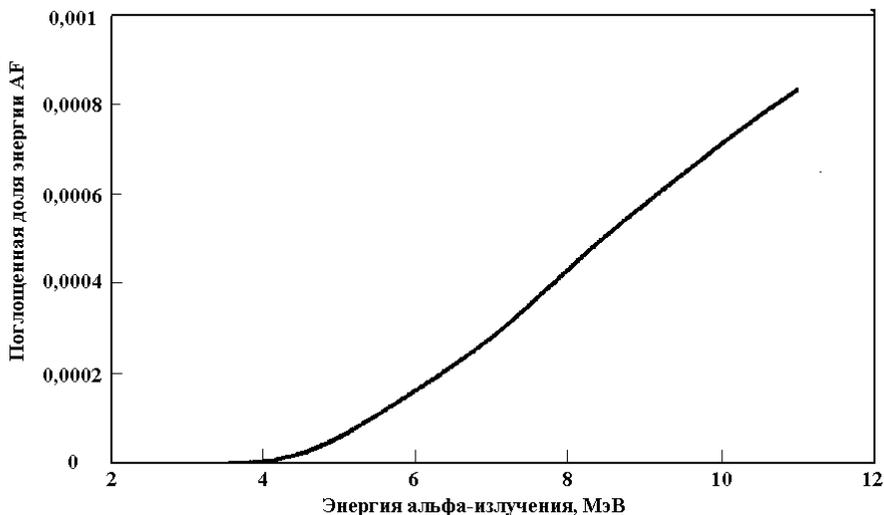
*для базальных клеток бронхиального отдела*



*для секреторных клеток бронхиального отдела*



*для бронхиолярного отдела*



*при альвеолярном отделе в качестве органа-источника*

### *Литература*

1. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66 // Annals of the ICRP. – 1994. V. 24. N 1-3.
2. Guide for the Practical Application of the ICRP Human Respiratory Tract Model. Supporting Guidance 3 // Annals of the ICRP. – 2002. V. 32. N 1-2.
3. Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference Values. Publication 89 // Annals of the ICRP. – 2002. V. 32. N 3-4.
4. ICRP, 2015. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1. ICRP Publication 130 // Annals of the ICRP. 2015. V. 44. N 2.
5. ICRP, 2016. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3 (готовится к печати).
6. *Cristy M., Eckerman K.F.* Specific absorbed fractions of energy at various ages from internal photon sources // Report ORNL/TM-8381. 1987. V.1.

## Глава 5

# СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ РАДОНА И АЭРОЗОЛЕЙ КРОТКОЖИВУЩИХ ДОЧЕРНИХ ПРОДУКТОВ РАСПАДА РАДОНА И ТОРОНА В ВОЗДУХЕ

(И.П. Стаман)

*Основой контроля и управления радоновой атмосферой помещений является наличие средств и методов измерений, адекватных поставленным целям и решаемым задачам. Измерения объемной активности (ОА) радона и/или эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона и торона в воздухе могут выполняться для решения самых разных задач. Чаще всего эти измерения выполняются для оценки соответствия помещений установленным гигиеническим нормативам, для оценки текущих доз облучения населения и работников, разработки радонозащитных мероприятий и др. Соответственно этому должны применяться средства и методы измерений, позволяющие наиболее корректно и эффективно решить ту или иную задачу. Учитывая это, в настоящей главе приведено описание всех наиболее распространенных средств и методов измерений ОА радона и ЭРОА изотопов радона в воздухе. В приложении к главе перечислены современные средства измерений, которые прошли государственные испытания для утверждения типа и внесены в Государственный реестр средств измерений Российской Федерации.*

### 5.1. Классификация средств и методов контроля ОА радона в воздухе

Внутреннее облучение людей за счет радоновой атмосферы помещений обусловлено ингаляционным поступлением изотопов радона ( $^{222}\text{Rn}$  – радон и  $^{220}\text{Rn}$  – торон) и их короткоживущих дочерних

продуктов распада (ДПР) в организм с вдыхаемым воздухом. Причем примерно 95 % дозы внутреннего облучения людей формируется за счет вдыхания аэрозолей короткоживущих ДПР радона и торона, а вклад материнских изотопов,  $^{222}\text{Rn}$  и  $^{220}\text{Rn}$ , в дозы, по разным данным, составляет от 1 до 5 % [1, 2].

Доза внутреннего облучения ( $E_{\text{инг}}^{\text{Rn}}$ ) людей за счет ингаляционного поступления  $^{222}\text{Rn}$  и  $^{220}\text{Rn}$  и аэрозолей ДПР радона и торона в организм с вдыхаемым воздухом за время  $\tau$  (час) рассчитывается по формуле [2, 3–5]:

$$E_{\text{инг}}^{\text{Rn}} = 1,05 \cdot \tau \cdot d_{\text{Rn}} \cdot (C_{\text{ЭКВ}}^{\text{Rn}} + 4,6C_{\text{ЭКВ}}^{\text{Tn}}), \text{ мЗв}, \quad (5.1)$$

где  $C_{\text{ЭКВ}}^{\text{Rn}}$  – среднее значение эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона в воздухе за время  $\tau$ , Бк/м<sup>3</sup>;  $C_{\text{ЭКВ}}^{\text{Tn}}$  – среднее значение ЭРОА торона в воздухе за время  $\tau$ , Бк/м<sup>3</sup>;  $d_{\text{Rn}}$  – дозовый коэффициент (мЗв·м<sup>3</sup>·ч<sup>-1</sup>·Бк<sup>-1</sup>), соответствующий эффективной дозе облучения (мЗв) при пребывании человека в течение  $\tau=1$  ч в атмосфере с ЭРОА изотопов радона 1 Бк/м<sup>3</sup>.

Из формулы (5.1) следует, что для расчета доз внутреннего облучения людей за счет ингаляционного поступления изотопов радона и их короткоживущих дочерних продуктов распада с вдыхаемым воздухом необходимо знать время облучения и среднее значение ЭРОА изотопов радона в воздухе за это время. По мере появления новых научных данных численное значение дозового коэффициента для населения постоянно уточнялось: в фундаментальном отчете НКДАР ООН за 2000 г. [1] оно было принято равным  $9 \cdot 10^{-6}$  мЗв·м<sup>3</sup>·ч<sup>-1</sup>·Бк<sup>-1</sup>, в Публикациях 115 и 126 МКРЗ [6, 7] это значение решено оставить таким же. Более подробно вопрос о соотношении экспозиции радона в воздухе и дозе облучения населения обсуждается в главе 4.

Значение ЭРОА радона в воздухе можно измерить прямыми методами с применением так называемых радиометров аэрозолей ДПР радона или рассчитать по результатам измерений объемной активности (ОА) радона в воздухе, если известно значение коэффициента радиоактивного равновесия ( $F_{\text{Rn}}$ , отн. ед.) между радоном и короткоживущими ДПР в воздухе:

$$C_{\text{ЭКВ}}^{Rn} = F_{Rn} C_{Rn}, \quad (5.2)$$

где  $C_{Rn}$  – ОА радона в воздухе, Бк/м<sup>3</sup>.

Значения коэффициента радиоактивного равновесия  $F_{Rn}$  между радоном и короткоживущими ДПР в воздухе жилых помещений достаточно однородны по объему помещений. Для жилых и общественных зданий в нашей стране эти значения колеблются в диапазоне от 0,3 до 0,7. В тех случаях, когда значение  $F_{Rn}$  неизвестно, оно принимается равным 0,5 [3–5], а в [7, 8] рекомендуется принимать его равным 0,4. Из формулы (5.2) следует, что значение  $F_{Rn}$  можно определить, если одновременно измерить ОА и ЭРОА радона в воздухе.

Значение ЭРОА торона в воздухе принято измерять только прямыми методами с применением радиометров аэрозолей ДПР торона, поскольку в силу крайне малого периода полураспада материнского радионуклида <sup>220</sup>Rn (55,61 с) значение коэффициента радиоактивного равновесия  $F_{Tn}$  между торонам и его короткоживущими ДПР в воздухе может варьировать в объеме помещений в десятки раз. Чаще всего источником поступления торона в воздух помещений являются поверхности помещений (ограждения), поэтому значения  $F_{Tn}$  вблизи поверхности ограждающих конструкций близки к 1,0 и резко снижаются по мере удаления от них, достигая в разных точках по объему помещений 0,01 и менее.

Средства и методы контроля ОА радона и ЭРОА изотопов радона в воздухе классифицируются по измеряемой величине, по методу регистрации, по методу отбора проб воздуха и по характеру получаемой информации.

По *измеряемой величине* средства контроля радоновой атмосферы помещений принято делить на средства измерений ОА радона в воздухе, которые называют «радиометрами радона», и средства измерений ЭРОА изотопов радона в воздухе, называемые обычно «радиометрами аэрозолей ДПР радона и торона».

По *методу регистрации* средства измерений ОА радона в воздухе делятся на ионизационные, сцинтилляционные, полупроводниковые, адсорбционные, электретные и трековые радиометры радона. Средства измерений ОА радона в воздухе, основанные на ионизаци-

онном и сцинтилляционном методах регистрации альфа-излучения радона и ДПР, в настоящее время практически не применяются. Электронные радиометры радона в силу их дороговизны и невысокой стабильности метрологических характеристик в нашей стране и в большинстве зарубежных стран широкого распространения не получили. Действие практически всего парка современных средств измерений ОА радона в воздухе основано на использовании полупроводниковых и трековых детекторов (пленочные и твердотельные детекторы) для регистрации излучения радона и ДПР. Особняком в этом ряду стоят средства измерений, в которых в процессе отбора проб или экспонирования измерительных камер в контролируемой атмосфере радон накапливается в объеме адсорбента с последующей регистрацией гамма- или бета-излучения короткоживущих ДПР радиометрическим или спектрометрическим методами.

По *методу отбора проб воздуха* средства измерений ОА радона делятся на активные и пассивные. В активных средствах измерений воздух прокачивается через измерительную камеру для выравнивания ОА радона в объеме камеры и контролируемой атмосфере (радиометры радона) или прокачивается постоянно с определенным расходом воздуха через измерительную камеру (мониторы радона). Пассивные средства измерений ОА радона помещаются в контролируемую атмосферу на определенное время, в течение которого происходит или накопление радона в объеме адсорбента (адсорбционный метод измерений) или постоянное выравнивание ОА радона в измерительной камере радиометра и контролируемой атмосфере, которые разделены обычно диффузионной мембраной камеры радиометра.

По *характеру получаемой информации*, определяемой длительностью отбора проб воздуха или экспонирования оборудования в контролируемой атмосфере, средства измерений ОА радона делятся на экспрессные (иногда называемые мгновенными), квазиинтегральные и интегральные.

Экспрессными (или мгновенными) принято считать измерения, которые обычно реализованы на основе активного метода отбора проб воздуха за промежуток времени от нескольких минут до нескольких часов. Экспрессные измерения проводятся с применением как радио-

метров радона (определение ОА радона в воздухе), так и радиометров аэрозолей ДПР радона и торона (определение ЭРОА изотопов радона в воздухе и/или ОА отдельных короткоживущих дочерних продуктов радона и торона).

Квазиинтегральными принято считать измерения с длительностью отбора проб или экспонирования средств измерений в контролируемой атмосфере свыше 1 до 3–4 суток (реже – до 6 суток). На практике технология квазиинтегральных измерений реализована в основном адсорбционным методом с использованием в качестве адсорбента активированного угля.

Интегральными принято считать измерения с длительностью отбора проб или экспонирования средств измерений свыше 1 месяца. В настоящее время практически все интегральные измерения ОА радона в воздухе выполняются с использованием пленочных трековых детекторов [9].

По методу регистрации, методу отбора проб воздуха и характеру получаемой информации радиометры аэрозолей ДПР радона и торона менее разнообразны и представлены на отечественном рынке средств измерений в основном радиометрами аэрозолей с активной прокачкой проб воздуха через аэрозольный фильтр и последующей регистрацией альфа-излучения аэрозолей полупроводниковыми детекторами. По характеру получаемой измерительной информации радиометры аэрозолей относятся к экспрессным средствам измерений. Имеются единичные экземпляры радиометров аэрозолей, аэрозольная приставка типа AlphaPM к радон-монитору AlphaGUARD PQ-2000 и его модификациям, которые позволяют обеспечивать практически неограниченный по времени мониторинг ЭРОА изотопов радона в воздухе.

В ряду средств измерений ОА радона в воздухе отдельное место занимают так называемые мониторы радона, или радон-мониторы. Разнообразие типов этих средств измерений ОА радона в воздухе не столь велико, как других, их количество в практике измерений также незначительно в силу, прежде всего, специфической области их применения и стоимостных характеристик. Радон-мониторы по характеру получаемой информации одновременно могут относиться к средствам измерений экспрессного, квазиинтегрального и интегрального типа.

Контроль ОА радона в воздухе с применением радон-мониторов основан на постоянных измерениях ОА радона в течение последовательных промежутков времени, результаты которых выстраиваются в единый временной ряд. В итоге радон-монитор обеспечивает возможность получения результатов измерений ОА радона за определенный промежуток времени, который выбирается оператором в зависимости от решаемых задач. Естественно, что радон-монитор позволяет проследить любые изменения ОА радона в воздухе в течение всего времени мониторинга контролируемой атмосферы.

Поскольку назначение и область использования экспрессных (мгновенных), квазиинтегральных и интегральных радиометров, а также информативность результатов измерений, получаемых с использованием этого оборудования, принципиально отличаются, ниже они рассматриваются отдельно. Причем мы не будем останавливаться на старом приборном парке и охарактеризуем главным образом современные радиометры радона, которые наиболее широко применяются в практике радиационного контроля в Российской Федерации (см. Приложение к главе 5).

## **5.2. Экспрессные средства и методы измерений ОА радона в воздухе**

Экспрессными (или мгновенными) принято считать измерения, которые обычно реализованы на основе активного метода отбора проб воздуха за промежуток времени от нескольких минут до нескольких часов. Экспрессные измерения ОА радона проводятся с применением радиометров радона. В некоторых типах радиометров аэрозолей реализовано определение ОА отдельных короткоживущих дочерних продуктов радона, что, с некоторыми оговорками, позволяет оценить ОА радона в воздухе по объемной активности  $^{218}\text{Po}$ .

Радиометрам аэрозолей ДПР радона в воздухе будет посвящен отдельный раздел, здесь же мы рассмотрим только радиометры для экспрессных измерений ОА радона в воздухе. В настоящее время наиболее широко распространены два типа таких радиометров: ставший

уже классическим радиометр РРА ряда модификаций и радиометры, основанные на осаждении радона из воздуха на адсорбентах, в основном активированном угле разных марок.

Принцип действия и процедура измерений ОА радона радиометрами типа РРА исключительно просты, с чем еще, кроме стоимостных характеристик, возможно, и связана их популярность в стране. Воздух в контролируемом помещении прокачивается через осушитель и далее – через измерительную камеру радиометра, в которой установлен полупроводниковый детектор. Встроенная воздуходувка радиометра выполняет простую функцию прокачки воздуха, время прокачки принято с большим запасом, так что единственными метрологическими характеристиками радиометра, которые подлежат контролю при поверке, являются уровень собственного фона и основная погрешность.

Технология экспресс-измерений ОА радона в воздухе с использованием угольных адсорберов несколько более сложная и требует определения объема воздуха, который прокачивается через сорбент. Измерение ОА радона в воздухе данным методом включает отбор проб воздуха (прокачка определенного объема воздуха через адсорбент в измерительной камере) с последующей регистрацией гамма-излучения ДПР с использованием радиометра или гамма-спектрометра.

Широкое распространение получила модификация данного метода, в которой регистрируется бета-излучение ДПР. В этом случае перед установкой в блок регистрации сорбент высыпается в специальную чашку для обеспечения стандартных условий измерений. Преимущество этой модификации метода, реализованной в аппаратном комплексе «Камера», состоит в небольшой массе комплекса, что позволяет использовать его в полевых условиях для измерений ОА радона в воздухе помещений.

Нижняя граница диапазона измерений ОА радона в воздухе с применением экспрессных средств измерений обычно составляет 20 Бк/м<sup>3</sup> или чуть выше, что позволяет их применять для измерений ОА радона практически во всех типах объектов. Верхняя граница диапазона измерений ОА радона радиометрами типа РРА составляет 20 кБк/м<sup>3</sup>, что также достаточно для контроля радоновой атмосферы

жилых, общественных и производственных зданий. Верхняя граница диапазона измерений ОА радона для радиометров с принудительной прокачкой воздуха и осаждением радона в измерительных камерах с адсорбентом примерно такая же. Однако при необходимости диапазон измерений этих средств измерений может быть расширен в обе стороны за счет изменения объема прокачки анализируемого воздуха. Увеличением объема отбираемой пробы воздуха достигается расширение диапазона измерений в сторону более низких значений ОА радона, а уменьшением объема пробы воздуха обеспечивается расширение диапазона измерений в сторону больших значений ОА радона в воздухе, чем при стандартных условиях измерений.

Относительная погрешность измерений ОА радона в воздухе с применением современных средств экспресс-анализа составляет около 30 %, что вполне достаточно для выполнения измерений в соответствии с их назначением.

Основными преимуществами экспрессных методов и средств измерений ОА радона в воздухе являются их простота и возможность выполнения значительного числа последовательных измерений. На этом преимущества заканчиваются, поскольку результаты этих измерений не дают даже общего представления о среднегодовом значении показателя, требуют обязательного присутствия оператора и т. д. Результаты экспрессных измерений ОА радона в воздухе могут служить основой для оценки степени актуальности проблемы в обследованных зданиях, а также при выборе объектов контроля для определения среднегодовых значений показателя соответствующими адекватными методами.

При определенных условиях результаты экспресс-измерений ОА радона в воздухе могут быть использованы при оценке соответствия здания после окончания его строительства (реконструкции или капитального ремонта) установленным нормативам по содержанию радона в воздухе [10, 11]. Однако и в этой области контроля ОА радона в воздухе помещений более предпочтительными являются радиометры аэрозолей ДПР радона и торона, о которых будет сказано ниже.

Определение среднегодовых уровней ОА радона в воздухе помещений по результатам экспресс-измерений объемной активности радона в воздухе практически невозможно.

### 5.3. Квазиинтегральные средства и методы измерений ОА радона

Квазиинтегральными принято считать измерения с длительностью отбора проб или экспонирования средств измерений в контролируемой атмосфере свыше 1 дня до 3–4 суток (реже – до 6 суток). На практике технология квазиинтегральных измерений реализована в основном адсорбционным методом с использованием в качестве адсорбента активированного угля разных марок, которым заполняется цилиндрическая измерительная камера с отверстиями. Для регистрации гамма-излучения короткоживущих ДПР радона применяются радиометры или спектрометры.

Известна модификация квазиинтегрального метода, в котором накопленную в адсорбенте активность определяют по бета-излучению ДПР. Отличительными особенностями этого метода являются необходимость перед измерением активности радона высыпать адсорбент в специальную измерительную чашку и отсутствие необходимости в специальной свинцовой защите детекторов. Отсутствие защиты детектора позволяет проводить измерения квазиинтегральной ОА радона в полевых условиях.

Во всем остальном обе модификации квазиинтегрального метода измерений ОА радона в воздухе идентичны и достаточно широко используются на практике.

Можно показать, что в условиях, когда сорбционная емкость адсорбента в накопительной камере еще достаточно велика, баланс активности радона в объеме адсорбента в момент времени ( $\tau$ ) описывается уравнением [12, 13]:

$$\frac{dA(\tau)}{d\tau} = \varepsilon \cdot C - \lambda \cdot A(\tau), \quad (5.3)$$

где  $\varepsilon$  – градуировочный (калибровочный) коэффициент ( $\text{м}^3/\text{с}$ ), численное значение которого зависит от сорбционных свойств адсорбента, характеристик накопительной камеры, длительности экспонирования и ряда других параметров, определяется в процессе экспериментальных исследований и в последующем контролируется при периодической поверке радиометра;  $A(\tau)$  – активность  $^{222}\text{Rn}$  (Бк), накопленная в

объеме адсорбента в измерительной камере к моменту времени  $\tau$  (с);  $\lambda$  – постоянная распада  $^{222}\text{Rn}$ , равная  $0,181 \text{ сутки}^{-1}$  или  $2,097 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ ;  $C$  – среднее значение ОА радона в воздухе в период калибровки, Бк/м<sup>3</sup>.

Решение уравнения (5.3) при нулевой начальной активности радона в адсорбенте имеет вид:

$$A(\tau) = \frac{\varepsilon}{\lambda} C [1 - \exp(-\lambda t)]. \quad (5.4)$$

Очевидно, что линейный участок накопления радона в измерительной камере по формуле (5.4) не превышает одного периода полураспада радона (3,82 суток). Этот промежуток времени является наиболее благоприятным как с точки зрения метрологического обеспечения квазиинтегральных измерений, так и в плане проведения самих измерений. Дело в том, что на линейном участке кривой накопления радона в объеме адсорбента потенциалом диффузионного переноса радона в объем измерительной камеры является разность ОА радона в воздухе вне камеры и в поровом пространстве адсорбента. Поэтому на этом участке при достаточно высокой сорбционной активности адсорбента ОА радона в воздухе порового пространства близка к нулю, так что накопленная активность радона характеризует среднее значение ОА радона в контролируемой атмосфере за время экспонирования измерительных камер.

Именно в этом и состоит основное преимущество квазиинтегрального метода измерений, результаты которых сглаживают суточные вариации ОА радона в воздухе помещений, а также изменения в период измерений ОА радона из-за влияния атмосферных и метеоусловий, режима эксплуатации помещений и др.

На линейном участке кривой адсорбции радона в измерительной камере, когда еще достаточно хорошо выполняется условие  $\lambda \cdot \tau < 1$ , накопленная активность  $^{222}\text{Rn}$  в адсорбенте определяется простым линейным соотношением:

$$A(T) \cong \varepsilon(T) \cdot T \cdot \bar{C}(T), \quad (5.5)$$

где  $A(T)$  – активность радона, накопленная за время  $T$ ;  $\varepsilon(T)$  – калибровочный коэффициент при времени экспонирования измерительных

камер  $T$ ;  $T$  – фиксированные значения времени экспонирования измерительных камер, которые для удобства при поверке радиометров и выполнении измерений принимаются равными 1, 2 и 3 суткам.

При таком выборе сроков экспонирования измерительных камер в контролируемой атмосфере процедура поверки средств измерений квазиинтегральной ОА радона в воздухе фактически сводится к определению для них двух основных метрологических характеристик. Уровень собственного фона измерительных камер с адсорбентом определяется по результатам определения показаний регистрирующего устройства (радиометра или спектрометра гамма-излучения) от нескольких подготовленных к измерениям камер. А численные значения калибровочного коэффициента для разной длительности измерений определяют относительным методом – путем прямого сравнения активности радона, накопленного в измерительной камере, с активностью радона в образцовой мере. При поверке радиометров обычно определяют также их показания от контрольного источника, которые в последующем используются для проверки работоспособности регистрирующего устройства.

В процедуре определения калибровочного коэффициента квазиинтегральных средств измерений ОА радона в воздухе имеется одна тонкость, которая на практике учитывается редко. Суть ее заключается в том, что эффективность регистрации гамма-излучения ДПР определяется с использованием не образцовой меры активности  $^{222}\text{Rn}$ , а образцовой меры активности  $^{226}\text{Ra}$ . Спектры гамма-излучения таких мер отличаются, хотя и незначительно. Поэтому если в качестве регистрирующего устройства используется гамма-спектрометр, то эти различия можно учесть путем выделения для измерений определенной области спектра гамма-излучения ДПР, характерной именно для них. Если же для измерений используется радиометр гамма-излучения, то необходимо строго выставлять и периодически контролировать пороги регистрации гамма-излучения.

С учетом этого процедура определения калибровочного коэффициента квазиинтегральных средств измерений ОА радона в воздухе сводится к следующему. Используя образцовую меру активности  $^{222}\text{Rn}$  (или  $^{226}\text{Ra}$ ), идентичную по конструкции и габаритам с изме-

рительными камерами, определяют эффективность регистрации ( $\xi$ ) гамма-излучения ДПР по формуле:

$$\xi = (n_{OM} - n_0) / A_{OM}, \quad (5.6)$$

где  $A_{OM}$  – активность  $^{222}\text{Rn}$  (или  $^{226}\text{Ra}$ ) в образцовой мере,  $n_{OM}$  и  $n_0$  – показания регистрирующего устройства от образцовой меры активности и фоновой измерительной камеры (уровень собственного фона измерительных камер с адсорбентом) соответственно.

Помещают измерительные колонки в атмосферу с известной ОА радона в воздухе и экспонируют их в течение заданного времени, после чего (не ранее 2,5–3 ч после окончания экспозиции) определяют показания регистрирующего устройства от экспонированных измерительных камер  $n_{ик}(T)$  и рассчитывают численное значение калибровочного коэффициента по формуле:

$$\varepsilon(T) = \frac{n_{ик}(T) - n_0}{\xi \cdot T \cdot \bar{c}(T)}, \quad (5.7)$$

где обозначения типа  $X(T)$  указывают, что численное значение величины определено для времени экспонирования измерительных колонок  $T$  суток.

При такой процедуре определения метрологических характеристик квазиинтегральных средств измерений ОА радона в воздухе порядок выполнения измерений становится достаточно простым. После экспонирования измерительных камер в контролируемой атмосфере в течение заданного времени  $T$  суток, определяют показания регистрирующего устройства от экспонированных измерительных камер  $n_{ик}$  и рассчитывают значение средней за время экспонирования ОА радона в воздухе по формуле:

$$\bar{c}(T) = \frac{n_{ик}(T) - n_0}{\xi \cdot T \cdot \varepsilon(T)}, \quad \text{Бк/м}^3. \quad (5.8)$$

Расчетную формулу (5.8) можно упростить, если отдельные значения эффективности регистрации  $\xi$  и калибровочного коэффициента  $\varepsilon(T)$  заменить их произведением и назвать эту величину чувствительностью измерений  $\zeta(T) = \xi(T) \cdot \varepsilon(T)$ . Ее обычно и вносят в свидетельство о поверке, включая в свидетельство также уровень собственного

фона измерительных камер и показания радиометра или спектрометра от контрольного источника.

Нижняя граница диапазона измерений ОА радона в воздухе с применением квазиинтегральных средств измерений обычно составляет 20–30 Бк/м<sup>3</sup> при сроках экспонирования измерительных камер не менее 3 суток, что позволяет их применять для измерений ОА радона практически во всех типах объектов. Верхняя граница диапазона измерений ОА радона квазиинтегральными средствами составляет около 20 кБк/м<sup>3</sup>, что также достаточно для контроля радоновой атмосферы жилых, общественных и производственных зданий.

Как и для радиометров радона экспрессного типа, при необходимости диапазон измерений квазиинтегральных средств измерений может быть расширен в обе стороны за счет изменения времени экспонирования измерительных камер в контролируемой среде. Увеличением сроков экспонирования достигается расширение диапазона измерений в сторону более низких значений ОА радона, а уменьшением экспозиции обеспечивается расширение диапазона измерений в сторону больших значений ОА радона в воздухе, чем при стандартных условиях измерений. Однако при этом требуется более тщательное соблюдение условий измерений, прежде всего по влажности контролируемой атмосферы.

Относительная погрешность измерений ОА радона в воздухе с применением современных средств квазиинтегральных средств измерений составляет около 30 %, что вполне достаточно для выполнения измерений в соответствии с их назначением.

Квазиинтегральный метод измерений в определенной мере сочетает в себе преимущества экспрессных и интегральных методов. Во-первых, этим методом, как и интегральным, можно проводить довольно большое количество измерений одновременно. Во-вторых, можно выбирать время экспонирования измерительных камер в контролируемой атмосфере, начиная от одних суток, что позволяет получать информацию о значениях ОА радона в воздухе достаточно оперативно. Наконец, в-третьих, результат оказывается нечувствительным к краткосрочным изменениям ОА радона, которые связаны с суточными вариациями режима эксплуатации зданий, погодных условий и т.п.

Наиболее перспективно применение квазиинтегрального метода измерений ОА радона в воздухе для оценки соответствия гигиеническим нормативам зданий и сооружений, сдающихся в эксплуатацию после окончания строительства, капитального ремонта и реконструкции. А также для первичной оценки ОА радона в воздухе эксплуатируемых зданий и последующего определения среднегодовых значений показателя и др. Применение квазиинтегрального метода измерений ОА радона в воздухе для определения среднегодовых значений показателя возможно, однако это требует значительного числа повторных измерений в одних и тех же зданиях в разные сезоны года.

#### 5.4. Интегральные средства и методы измерений ОА радона в воздухе

Интегральными принято считать измерения с длительностью отбора проб или экспонирования средств измерений свыше одного месяца. В настоящее время практически все интегральные измерения ОА радона в воздухе выполняются с использованием пленочного трекового детектора типа Kodak LR-115 Type II толщиной около 12 мкм. В некоторых странах интегральные измерения выполняются с применением твердотельных детекторов типа CR-39, требующих более сложной технологии обработки и считывания измерительной информации [9].

Технология измерений ОА радона в воздухе интегральным методом достаточно проста и заключается в следующем. При попадании альфа-частицы на поверхность трекового детектора в нем образуется дефект или латентный (невидимый) трек. Причем форма и размеры треков зависят от энергии альфа-частицы, от угла ее падения на детектор, характеристик материала самого детектора и др. Ясно, что чем выше ОА радона в воздухе и чем дольше экспонируется детектор, тем большей будет плотность треков на поверхности детектора, накопление которых описывается формулой:

$$\Delta n(\tau) = \varepsilon \cdot \Delta \tau \cdot \bar{C}_{Rn}(\Delta \tau) \quad , \quad \text{см}^{-2} \quad , \quad (5.9)$$

где.  $\Delta n(\tau)$  – прирост плотности треков на поверхности трекового детектора к моменту времени  $\tau$  за промежуток времени  $\Delta\tau$ ;  $\varepsilon$  – коэффициент пропорциональности, численное значение которого зависит от конструкции измерительной камеры, характеристик трекового детектора, условий его травления и т. д. и определяется при поверке;  $\bar{C}_{\text{rn}}(\Delta\tau)$  – среднее значение ОА радона в воздухе в промежутке времени от  $\tau$  до  $\tau + \Delta\tau$ .

После экспонирования трековый детектор подвергается специальному химическому или электрохимическому травлению в жидкой среде при фиксированных значениях температуры и рН, в процессе которого латентные треки становятся видимыми. Режим травления трекового детектора по температуре, длительности и рН раствора подбирается в специальных экспериментах. Причем подбор режима травления обычно проводится исходя из того, чтобы обеспечить максимальную эффективность регистрации при минимальном уровне собственного фона трекового детектора.

После травления и сушки трекового детектора определяют плотность треков на его поверхности. На начальной стадии внедрения трекового метода измерений в практику радиационных измерений основным методом определения плотности треков на поверхности детектора был визуальный – с помощью обычного оптического микроскопа. В последующем были разработаны различные методы автоматического определения плотности треков, в том числе и электроискровой метод счета, который и применяется в Российской Федерации.

Для интегральных измерений ОА радона в воздухе трековым методом применяются самые разные измерительные камеры, в которые устанавливают образец трекового детектора, закрепленный обычно на специальных пальцах для удобства последующего травления и счета. Измерительные камеры могут быть открытыми с одной стороны (торца), с окошком без фильтра или с фильтром для предотвращения поступления ДПР радона (в некоторых модификациях камер – еще и торона) в измерительный объем с трековым детектором. Различные виды и конструкции измерительных камер, применяемых в разных странах для интегральных измерений ОА радона в воздухе,

подробно описаны в [9]. Учитывая это, здесь мы подробнее остановимся на метрологических аспектах трековой радиометрии радона.

Как следует из сказанного выше, накопление треков на поверхности трекового детектора описывается формулой (5.9), из которой легко получить расчетную формулу для определения интегральной ОА радона в воздухе трековым методом:

$$\bar{C}_{Rn}(T) = [n(T) - n_0]/(\varepsilon \cdot T) \text{ , Бк/м}^3 \text{ ,} \quad (5.10)$$

где  $\bar{C}_{Rn}(T)$  – значение интегральной (средней за время экспонирования измерительной камеры  $T$ ) ОА радона в воздухе;  $n(T)$  – плотность треков на поверхности трекового детектора к моменту окончания экспонирования  $T$ ;  $n_0$  – уровень собственного фона трекового детектора.

Из формул (5.9) и (5.10) следует, что в трековой радиометрии радона фактически определяемой величиной является произведение интегральной ОА радона в воздухе на длительность экспонирования измерительных камер в контролируемой атмосфере  $\bar{C}_{Rn} \cdot T$ . Это очень важный аспект трековой радиометрии радона, поскольку за счет выбора диапазона времени экспонирования измерительных камер фактически удастся выбрать нужный диапазон измеряемых значений интегральной ОА радона в воздухе. В свою очередь, верхняя граница диапазона значений произведения  $\bar{C}_{Rn} \cdot T$  определяется максимальной плотностью треков, при которой считывающее устройство может близкие друг к другу треки регистрировать отдельно.

Таким образом, основные преимущества интегрального трекового метода определения ОА радона в воздухе состоят в следующем. Во-первых, трековый метод является единственным, который позволяет проводить одновременно измерения в большом количестве объектов контроля с такой длительностью, которая дает наилучшую оценку среднегодового значения ОА радона в воздухе. Во-вторых, в технологии трековой радиометрии можно варьировать длительность экспонирования измерительных камер в зависимости от уровня ОА радона в воздухе, что крайне важно при классических вариантах выборочного обследования зданий. Как видно из формулы (5.10), чем больше экспозиция измерительных камер,

тем более низкие значения ОА радона могут быть достоверно определены.

Кроме того, трековый метод позволяет сглаживать влияние различных факторов, в том числе суточных и даже сезонных изменений ОА радона в воздухе помещений, на результат измерений, который получается как «среднее за время измерений значение ОА радона в воздухе». И наконец, трековый метод является единственным, который позволяет проводить массовые измерения без посещения объектов контроля, поскольку небольшие габариты (обычно в несколько сантиметров) и масса (первые десятки граммов) допускают отправку и получение измерительных камер почтовой связью.

При тщательном подборе режимов травления трекового детектора и параметров счет плотности треков можно обеспечить определение интегральной ОА радона в воздухе трековым методом на уровне от 2–3 Бк/м<sup>3</sup>, до  $1 \cdot 10^{-5}$  Бк/м<sup>3</sup> и даже выше. Относительная погрешность измерений ОА радона в воздухе трековым методом составляет около 30 %. Однако такой достаточно хороший уровень качества измерений обеспечивается только при строгом соблюдении всех условий измерений.

Основное применение метод интегральной трековой радиометрии радона находит при определении среднегодовых значений ОА радона в воздухе помещений. Наилучшим приближением к среднегодовой ОА радона в воздухе помещений считается среднее значение по результатам двух измерений длительностью не менее трех месяцев, выполненных в теплый и холодный периоды года.

Основными недостатками трековой радиометрии радона являются сложность самой технологии измерений, дороговизна оборудования, неизбежные потери измерительных камер в процессе длительных измерений.

В числе недостатков трековой радиометрии радона имеется еще один, который проявляется, правда, редко. Это так называемый фединг трекового детектора, характеризующий его способность со временем «забывать информацию», которая на нем записана. Проявляется фединг трекового детектора в том, что при длительной экспозиции отдельные треки постепенно зарастают и исчезают, так что в последу-

ющем при считывании треков они не учитываются. Величина фединга трекового детектора типа Kodak LR-115 Type II невелика, однако при сроках экспонирования до шести месяцев она может привести к занижению измеренных значений ОА радона в воздухе примерно на 15–20 %. Поэтому оптимальным сроком экспонирования измерительных камер следует считать 3–4 месяца.

### **5.5 Радон-мониторы для измерений ОА и ЭРОА радона в воздухе**

В практике измерений ОА радона в воздухе в основном для исследовательских целей применяются мониторы радона или радон-мониторы. Как указано выше, по характеру получаемой информации радон-мониторы одновременно могут относиться к средствам измерений экспрессного, квазиинтегрального и интегрального типов.

Мониторинг ОА радона в воздухе с применением радон-мониторов заключается в постоянном измерении ОА радона в течение определенного промежутка времени (выбирается оператором), результаты которого выстраиваются в последовательный временной ряд. Тем самым обеспечивается возможность получения результатов измерений ОА радона за определенный, достаточно короткий промежуток времени (обычно от нескольких минут до 1 часа) в конкретный момент времени (экспрессные измерения). Усредняя результаты измерений за определенный период времени (от нескольких часов до нескольких суток), можно получить квазиинтегральное значение ОА радона в воздухе за этот период. А если усреднять результаты измерений за длительный период (месяцы и даже годы), то можно получить интегральное значение ОА радона в воздухе. Естественно, что радон-монитор позволяет проследить любые изменения ОА радона в воздухе в течение всего времени мониторинга контролируемой атмосферы. Так что эти квазиинтегральные и интегральные результаты измерений имеют принципиально другой характер, чем результаты измерений, полученные традиционными квазиинтегральными и интегральными методами, поскольку они позволяют проследить еще и временные изменения ОА радона в воздухе помещений.

Радон-мониторы могут быть основаны на пассивном и/или активном методах отбора проб воздуха. В случае мониторов с пассивным отбором проб воздуха измерительная камера имеет окно, в котором устанавливается мембрана, через которую радон диффундирует из воздуха в измерительную камеру. Такие мониторы обычно позволяют получать результаты измерений ОА радона в воздухе с некоторым запозданием, которое определяется диффузионными свойствами мембраны и подвижностью воздуха в помещении. В мониторах с активным методом отбора проб воздуха он просто прокачивается (непрерывно или определенное время в каждом цикле измерений) через измерительную камеру.

Как правило, в современных радон-мониторах для измерений ОА и/или ЭРОА радона используется ионизационный метод регистрации или применяется метод альфа-спектрометрии с использованием полупроводниковых детекторов.

Основным недостатком радон-мониторов является область их применения – практически для исследовательских задач, а отдельные типы радон-мониторов – еще и в метрологическом обеспечении измерений ОА радона в воздухе. Дело в том, что при любом виде отбора проб (пассивный в большей мере, активный – с прокачкой воздуха через ионизационную камеру, в меньшей) для получения результата измерений необходимо достаточно длительное время. Оно требуется для выравнивания ОА радона в объеме измерительной камеры и в контролируемой атмосфере, для распада осевших на стенки измерительной камеры аэрозолей ДПП и др. Так что для выполнения одного измерения ОА радона в воздухе требуется обычно несколько часов.

Диапазон измерений ОА радона в воздухе с использованием радон-мониторов составляет от нескольких единиц Бк/м<sup>3</sup> до 1–2 МБк/м<sup>3</sup>. Как и в трековой радиометрии радона, нижняя граница диапазона измерений ОА радона в воздухе с применением радон-мониторов определяется уровнем их собственного фона и продолжительностью измерений. Верхняя граница диапазона измерений ОА радона мониторами является метрологической характеристикой, которая обычно определяется при испытаниях. Чаще всего диапазон измерений делится на два-три поддиапазона, в пределах которых могут даже ис-

пользоваться различные методы регистрации. Так, при низких значениях ОА радона в воздухе измерительной камеры для определения ОА радона обычно регистрируется распад самого радона и всех его короткоживущих альфа-излучающих дочерних продуктов. Наоборот, когда ОА радона достаточно высока, ведется селективная регистрация только альфа-излучения радона. Поэтому отклик радон-мониторов на высокие уровни ОА радона в воздухе, составляющие  $1000 \text{ Бк/м}^3$  и выше, редко превышает 1 час, тогда как на уровне около  $100 \text{ Бк/м}^3$  и ниже корректное измерение ОА радона в воздухе может потребовать многих часов.

Относительная погрешность измерений ОА радона в воздухе радон-мониторов обычно составляет не менее 20–30 %, для отдельных типов таких мониторов с исключительно стабильными метрологическими характеристиками погрешность измерений может составлять около 10 %.

Основная область применения радон-мониторов – научные исследования процессов формирования радоновой атмосферы помещений, изучение влияния различных факторов на баланс радона в воздухе помещений разного типа, определение эманулирующей способности различных изделий и материалов и коэффициента диффузии радона в различных средах [14, 15]. Наиболее известный среди всех типов отечественных и зарубежных образцов радон-мониторов – AlphaGUARD PQ-2000 PRO, аттестованный в Российской Федерации в качестве образцового средства измерений ОА радона в воздухе с относительной погрешностью 6 %. Фактически он стал основой метрологического обеспечения средств измерений ОА радона в воздухе.

## **5.6 Средства и методы измерения ОА аэрозолей ДПР радона и торона в воздухе**

ОА аэрозолей короткоживущих ДПР радона и торона в воздухе обычно определяется экспрессными (мгновенными) методами измерений. Для этой цели аэрозоли – носители ДПР радона и торона, осаждаются на фильтр, что позволяет измерить их активность с ис-

пользованием детекторов практически любого вида. Чаще всего для этого применяются полупроводниковые или сцинтилляционные детекторы. Как правило, отбор проб аэрозолей проводится на аналитические фильтры типа АФА-РСП с объемной скоростью отбора проб воздуха в диапазоне от 1–2 до 10–20 л/мин (в зависимости от диаметра фильтра). Радиометрические фильтры типа АФА-РСП обеспечивают при этих расходах воздуха улавливание не менее 95 % аэрозолей, на которых содержатся ДПР радона и торона.

Измерение активности осевших на фильтр аэрозолей проводится либо непосредственно во время отбора пробы, либо после его окончания. Эти измерения выполняются спектрометрическим методом или методом временного анализа кривой распада ДПР радона и торона, на основании которого проводится определение ЭРОА изотопов радона либо раздельное определение ОА аэрозолей ДПР радона и торона.

Применяемые в настоящее время средства измерений позволяют определять ЭРОА радона в воздухе в пределах от 1–2 до  $10^5$  Бк/м<sup>3</sup>, а ЭРОА торона от 0,1–1,0 Бк/м<sup>3</sup> до  $10^5$  Бк/м<sup>3</sup>. Для всех рабочих средств измерений в качестве предела основной погрешности в диапазоне измерений принимается  $\delta \leq 30\%$ .

В практике измерений наибольшее распространение в силу своей простоты получили радиометрические методы определения ОА аэрозолей ДПР радона и торона в воздухе с использованием радиометров аэрозолей, которые в качестве обязательных включают последовательность следующих операций:

- отбор проб аэрозолей из воздуха на фильтрующий материал;
- регистрация  $\alpha$ -излучения осевших на фильтрующий материал аэрозолей ДПР радона и торона за определенный интервал (интервалы) времени в процессе отбора проб и/или после его окончания;
- расчет значений ОА аэрозолей ДПР радона и торона.

В основу этих методов определения ОА аэрозолей ДПР радона и торона положен принцип временной дискриминации  $\alpha$ -излучения

осевших на фильтр аэрозолей дочерних продуктов  $^{222}\text{Rn}$  и  $^{220}\text{Rn}$ , имеющих разные значения постоянных распада. Поэтому значение погрешности того или иного метода определения ОА аэрозолей ДПР радона и торона зависит в основном от степени корректности тех приближений, с учетом которых получены расчетные уравнения.

Радиометрические методы определения ОА аэрозолей ДПР радона и торона в воздухе в зависимости от количества циклов регистрации  $\alpha$ -излучения осевших на фильтр аэрозолей можно разделить на следующие группы:

- однотоочечные методы (оригинальный метод Кузнецца и др.), в которых  $\alpha$ -излучение аэрозолей на фильтре регистрируется только один раз;
- двухточечные методы (метод Маркова, модифицированный метод Кузнецца-Терентьева и др.), в которых  $\alpha$ -излучение осевших на фильтр аэрозолей регистрируется дважды;
- трехточечные методы (методы Томаса и Доманского, модифицированный метод Маркова-Терентьева и др.), в которых  $\alpha$ -излучение аэрозолей на фильтре регистрируется трижды;
- четырехточечные и пятиточечные методы (различные модификации метода Томаса), в которых  $\alpha$ -излучение аэрозолей регистрируется четыре или пять раз.

В настоящее время эти методы измерений ОА аэрозолей ДПР радона и торона в воздухе помещений практически не применяются. Измерение ОА аэрозолей ДПР радона и торона в воздухе современными радиометрами основано на применении полупроводниковых детекторов со спектрометрическим разделением и регистрацией  $\alpha$ -излучения аэрозолей.

Основными преимуществами экспрессных методов и средств измерений ОА аэрозолей ДПР радона и торона в воздухе являются их простота и возможность выполнения значительного числа последовательных измерений. Кроме того, эти методы являются единственными, которые позволяют оценить ЭРОА торона в воздухе и, что особенно важно в силу специфики нормирования в Российской Федерации, коэффициент равновесия между радоном и его короткоживущими

дочерними продуктами распада в воздухе. Однако на этом преимущества этих средств и методов заканчиваются, поскольку результаты этих измерений не дают даже общего представления о среднегодовом значении показателя, требуют обязательного присутствия оператора и т. д.

Результаты экспрессных измерений ОА аэрозолей ДПР радона и торона в воздухе могут служить основой для оценки степени актуальности проблемы в обследованных зданиях, а также при выборе объектов контроля для определения среднегодовых значений показателя соответствующими адекватными методами.

При определенных условиях результаты экспресс-измерений ОА аэрозолей ДПР радона и торона в воздухе могут быть использованы при оценке соответствия зданий после окончания их строительства (реконструкции или капитального ремонта) установленным нормативам по содержанию радона в воздухе [3, 16, 17].

Определение среднегодовых уровней ОА радона в воздухе помещений по результатам экспресс-измерений объемной активности радона в воздухе практически невозможно.

### **5.7. Метрологическое обеспечение измерений ОА радона и ЭРОА изотопов радона в воздухе**

Метрологическое обеспечение средств и методов измерений ОА радона и ЭРОА изотопов радона в воздухе в настоящее время, на наш взгляд, является одним из наиболее уязвимых мест в радиометрии радона. В основу государственной системы обеспечения единства измерений ОА аэрозолей ДПР ранее был положен ГЭТ 39-78 по ГОСТ 8.090-79 [18], в котором указаны пределы допускаемых относительных погрешностей образцовых средств измерений от 15 до 30 %, а для рабочих средств измерений – от 30 до 60 %. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 января 2015 г. № 129 эталону ГЭТ 39-78 после усовершенствования был присвоен номер ГЭТ 39-2014 при сохранении действия ГОСТ 8.090-79. Тем не менее, до сих пор при государственных испытаниях

средств измерений ОА аэрозолей ДПР радона и торона и последующей их поверке в качестве характеристик погрешности указывается величина не более 30 %.

Значительно хуже ситуация с метрологическим обеспечением средств измерений ОА радона в воздухе. Считается, что поверочная схема средств измерений ОА радона в воздухе основана на государственном эталоне ГЭТ 39-78 (с 2015 года ГЭТ 39-2014) по ГОСТ 8.090-79, а в качестве государственного рабочего эталона единицы объемной активности радона-222 в воздухе используется радиометр радона AlphaGUARD PQ-2000 PRO (номер в Государственном реестре средств измерений 44760-10). Диапазон воспроизведения и измерения ОА радона в воздухе для рабочего эталона принят равным  $1 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^6$  Бк/м<sup>3</sup> с характеристикой погрешности во всем диапазоне  $\pm 6$  %.

К сожалению, реальность состоит в том, что государственный эталон ГЭТ 39-78 (ГЭТ 39-2014) не предназначен для задания единицы ОА радона и контроля ее величины методами абсолютных измерений, что прямо вытекает и из его названия «Государственный первичный специальный эталон единицы объемной активности радиоактивных аэрозолей». Имеющаяся в ВНИИФТРИ установка для воспроизведения единицы ОА радона официального статуса «Государственный первичный специальный эталон» не имеет. В связи с этим отсутствует и официально утвержденная поверочная схема передачи размера единицы ОА радона от первичного эталона, которого нет, к рабочему эталону и рабочим средствам измерения ОА радона, аналогичная ГОСТ 8.090-79.

Еще одним существенным недостатком действующей в стране системы обеспечения единства измерений ОА радона и аэрозолей ДПР радона и торона в воздухе является отсутствие действенной практики систематических межлабораторных сличений средств и методов измерений. И хотя в Национальной системе аккредитации испытательных лабораторий предусмотрен самостоятельный критерий оценки соответствия лабораторий критериям аккредитации, тем не менее требования к участию испытательных лабораторий в Приказе № 326 Росаккредитации не конкретизированы [19].

## Литература

1. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation // UNSCEAR Report to the General Assembly with Scientific Annexes, Vol. I: Sources. – UN, NY, 2000.
2. *Крисюк Э.М.* Уровни и последствия облучения населения / *Э.М. Крисюк* // АНРИ. – 2002. № 1 (28). – С. 4-13
3. Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после окончания их строительства, капитального ремонта, реконструкции по показателям радиационной безопасности // Методические указания МУ 2.6.1.2838-11. Утверждены 28.01.2011 г. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. – 2011.
4. *Стамат И.П.* Оценка индивидуальных эффективных доз облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения / *И.П. Стамат, А. Н. Барковский, Э.М. Крисюк.* [и др.] // Методические указания МУ 2.6.1.1088-02. Утверждены 04.01.2002 г. – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России. – 2002.
5. *Стамат И.П.* Оценка доз облучения групп населения, подвергающихся повышенному облучению за счет природных источников ионизирующего излучения / *И.П. Стамат, А.В. Колотвина, Д.В. Кононенко* [и др.] // Методические указания МУ 2.6.1.2397-08. Утверждены 02.07.2008 г. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. – 2008. – 18 с.
6. Риск возникновения рака легкого при облучении радоном и продуктами его распада. Заявление по радону / под ред. *М.В. Жуковского, С.М. Киселева, А.Т. Губина* / пер. Публикации 115 МКРЗ // ICRP. – Москва: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России». – 2013.
7. Руководство по защите от облучения радоном / под ред. *М.В. Жуковского, И.В. Яρμοшенко, С.М. Киселева* / пер. Публикации 126 МКРЗ // ICRP. – Москва: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России». – 2015.

8. Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation. IAEA No SSG-32 // IAEA. – Vienna, 2015.
9. *Николаев В.А.* Твердотельные трековые детекторы в радиационных измерениях / В. А. Николаев. – СПб.: Изд. Политехнического университета. – 2012.
10. *Стамат И.П.* Совершенствование нормативно-методических основ обеспечения радиационной безопасности населения при облучении природными источниками: разработка и обоснование гигиенических нормативов на отдельные источники природного облучения населения / *И.П. Стамат, Т.А. Балабина, В.А. Венков* [и др.] // Отчет заключительный по договору № 25-06/2009 от 15 апреля 2009 г. – СПб. – 2009.
11. Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после окончания их строительства, капитального ремонта, реконструкции по показателям радиационной безопасности // Методические указания. МУ 2.6.1.2838-11. – М.: ФБУЗ «Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора». – 2011.
12. *Крисюк Э.М.* Радиационный фон помещений / *Э.М. Крисюк*. – М.: Энергоатомиздат. – 1989.
13. *Терентьев М.В., Петренко А.Г., Стамат И.П.* Пассивный диффузионный пробоотборник  $^{222}\text{Rn}$ : авт. свид. СССР № 1827019 на изобр.: кл. G 01 N 1/02 / *М.В. Терентьев, А.Г. Петренко, И.П. Стамат* // Заявка на изобретение № 5013626/05 от 05.11.91 г.; опубли. 07.07.93 г. – Бюл. № 25.
14. *Стамат И. П.* Оценка вклада эманирования радона с поверхности облицовочных изделий в облучение населения / *И.П. Стамат, А.В. Световидов, Д.И. Стамат* [и др.] // Радиационная гигиена. – 2009. Т. 2, № 4. – С. 16–22.
15. *Световидов А.В.* Исследование радонозащитных характеристик облицовочных изделий и материалов / *А.В. Световидов, И.П. Стамат, В.А. Венков* // Радиационная гигиена. – 2014. Т. 7, № 3. – С. 19–25.

16. *Стамат И.П.* Обоснование методики оценки среднегодового значения ЭРОА изотопов радона в воздухе зданий после окончания строительства/ *И.П. Стамат, И.А. Ракитин, Г.А. Горский [и др.]* // Радиационный контроль. Радиохимические методы исследования: матер. науч.-практ. конф. – СПб. – 2010. – С. 89–95.
17. *Соловьев М.Ю.* Содержание радона в воздухе вновь построенных и эксплуатируемых зданий в Ростовской области / *М.Ю. Соловьев, М.В. Калинина, И.П. Стамат* // Радиационная гигиена. – 2010. Т. 3, № 2. – С. 62-66.
18. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений объемной активности радиоактивных аэрозолей// ГОСТ 8.090-79. – М.: Издательство стандартов. – 1980.
19. Приказ Министерства экономического развития Российской Федерации от 30.05.2014 г. № 326 «Об утверждении критериев аккредитации, перечня документов, подтверждающих соответствие заявителя, аккредитованного лица критериям аккредитации, и перечня документов в области стандартизации, соблюдение требований которых заявителями, аккредитованными лицами обеспечивает их соответствие критериям аккредитации». – 2014.

*Приложение к главе 5*

### **Основные типы средств измерений ОА и ЭРОА радона и торона в воздухе в Государственном реестре РФ (2016 год)**

Наименование и тип	Фирма / страна	Измеряемый параметр	Способ отбора проб	Метод регистрации сигнала	Примечание
<b>1. Интегральные средства измерений ОА и ЭРОА района и торона в воздухе</b>					
Трековый комплекс ТРЕК-РЭИ-1, ТРЕК-РЭИ-1М	ООО «Группа компаний РЭИ», г.Москва	Средняя ОА района за время экспонирования	Пассивный	Пленочный трековый детектор	Нитроцеллюлозная пленка К-6, LR-115. Срок экспонирования до 3 месяцев без учета фединга
<b>1.1. Радоновые мониторы</b>					
PGA-04	ООО «НТМ-Защита» г.Москва	ОА района	Пассивный	ППД с электростатическим осаждением <sup>218</sup> Po, <sup>214</sup> Po	Мониторинг района Время непрерывной работы не менее 7 суток
AlphaGUARD PQ2000	«Genitron Instruments» (Германия)	ОА района	Пассивный	Импульсная ионизационная камера с 3В-спектрометрической обработкой сигнала	Непрерывное изменение ОА района, температуры, давления и относительной влажности воздуха.
AlphaGUARD Mod. PQ2000-M	«Saphimo GmbH» (Германия)	ОА района	Пассивный (активный со специальной воздушной вдувкой)		То же. Возможно применение для проверки рабочих средств измерений ОА района в воздухе
AlphaGUARD PQ2000PRO	«Saphimo GmbH» (Германия)	ОА района	Пассивный		То же. Возможно применение для проверки рабочих средств измерений ОА района в воздухе

Наименование и тип	Фирма / страна	Измеряемый параметр	Способ отбора проб	Метод регистрации сигнала	Примечание
Radon Scout / Radon Scout Plus (PGA-1100 /PGA-1100 Плюс)	SARAD (Германия)	ОА радона	Пассивный	Импульсная ионизационная камера, альфа-спектрометрия	Непрерывное изменение ОА радона, температуры, давления и относительной влажности воздуха
RTM-1668/2200 (PPA-1688/2200)	SARAD (Германия)	ОА радона	Активный	Альфа-спектрометрия	Возможно использование в качестве монитора радона
<b>1. Квазинтегральные средства измерений ОА радона в воздухе</b>					
Комплекс измерительный для мониторинга радона «Камера -01»	ЗАО НТЦ НИ-ТОН (Россия)	ОА радона в воздухе помещений, повышенном воздухе и воде	Активный (пассивный с использованием угольных адсорберов)	Сцинтилляционные детекторы гамма- и бета-излучения	Средняя ОА радона в воздухе помещений за 1-6 суток.
					Средняя ОА радона в почвенном воздухе за 1-10 часов. Удельная активность радона-222 в воде
<b>3. Средства измерений ОА радона и торона мгновенного типа</b>					
<b>3.1. Средства измерений ОА радона и торона в воздухе</b>					
Радиометр радона PPA-01M-01	НТМ «Защита» (Россия)	ОА радона, ОА торона в воздухе	Активный Фильтр: АФА РСП 10	ППД с электростатическим осаждением <sup>218</sup> Ро, <sup>216</sup> Ро	

Наименование и тип	Фирма / страна	Измеряемый параметр	Способ отбора проб	Метод регистрации сигнала	Примечание
Радиометр района РРА-01М-03	НТМ «Защита» (Россия)	ОА района ОА торона в воздухе	Активный Фильтр: АФА РСР 10	ППД с электростатическим осаждением $^{218}\text{Po}$ , $^{216}\text{Po}$	Дополнительно измеряемые параметры: температура, давление и относительная влажность воздуха Возможно использование в качестве монитора района
<b>3.2. Средства измерений ЭРОА района и торона</b>					
Радиометр «РАА-10»	НТМ «Защита» (Россия)	ЭРОА района и торона	Активный АФА РСР 10	ППД	
Радиометр РАМОН-01М	ТОО «СОЛО»	ЭРОА района и торона, ОА аэрозолей ДПР и ДПТ	Активный АФА РСР 20	Альфа-спектрометрия	В качестве рабочего эталона предназначен для проверки рабочих средств измерений
Радиометр РАМОН-02	ТОО «СОЛО ЛТД»	ЭРОА района и торона	Активный АФА РСР 20	Кремниевый ППД	
РАА-20П2 «Поиск»	НТЦ «НИТОН»	ЭРОА района и торона	Активный Фильтр: АФА РСР 3	Альфа-спектрометрия	Имеется возможность оценки коэффициента равновесия
РАА-3-01 «АльфаАЭ-РО»	ООО НТЦ Ам-плитула	ЭРОА района и торона	Активный Фильтр: АФА РСР 3	Альфа-спектрометрия	Имеются возможности: – оценки коэффициента равновесия; – работы в режиме монитора до 14 суток; – контроля температуры окружающего воздуха

## Глава 6

# МЕТОДЫ ОБСЛЕДОВАНИЯ УРОВНЕЙ ОБЛУЧЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ РАДОНОМ В ЖИЛЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЯХ

(И.П. Стамат, И.В. Ярмошенко)

*Объективная и надежная оценка ситуации облучения – необходимый этап обоснования и оптимизации радиационной безопасности при обращении с любым источником ионизирующего излучения. Уровни облучения населения радоном достаточно надежно могут быть определены по данным измерений объемной активности радона и/или ДПР радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий, а также на рабочих местах. Для решения задач защиты населения в производственных и коммунальных условиях от радона в качестве первоочередного мероприятия проводят обследование зданий и рабочих мест.*

*Различают контроль облучения населения радоном в отдельных зданиях и обследование уровней облучения населения территории (населенного пункта, района, субъекта Федерации или страны) в целом. В настоящей главе рассмотрены задачи и методические подходы, которые соответственно ставятся и применяются в этих двух основных видах радоновых обследований.*

### **6.1 Радиационное обследование зданий для целей определения среднегодовых значений ОА радона в воздухе помещений**

При радиационном обследовании отдельных зданий по фактору «радон» различают два основных типа зданий: новые здания, сдающиеся в эксплуатацию после окончания строительства, капитального ремонта или реконструкции, и эксплуатируемые здания жилищного, общественного и производственного назначения с длительным или

постоянным пребыванием в них людей. Возможности и условия оценки соответствия этих двух типов зданий установленным гигиеническим нормативам по среднегодовым уровням ОА (или ЭРОА) радона принципиально отличаются.

Для новых зданий практически невозможно выполнить прямые инструментальные измерения для определения среднегодового значения ОА радона или ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений ввиду того, что по понятным причинам эти измерения не могут быть интегральными и длиться 2–3 месяца или более. В них также сложно воспроизвести реальные условия эксплуатации зданий в будущем, когда они будут использоваться в штатном режиме. Основной целью радиационного обследования новых зданий является использование такой процедуры измерений и расчетов, которая гарантированно обеспечит соответствие здания установленным нормативам после введения их в эксплуатацию. Поэтому радиационное обследование новых зданий предполагает не определение среднегодового значения ОА радона в воздухе помещений, а оценку его максимального значения.

Радиационное обследование эксплуатируемых зданий проводится для радиационно-гигиенической паспортизации территорий и/или контроля и учета индивидуальных доз облучения, в рамках осуществления текущего санитарно-эпидемиологического надзора для социально-гигиенического мониторинга или иных программ, а также по заявкам отдельных граждан. В некоторых случаях радоновое обследование отдельных эксплуатируемых зданий проводится для уточнения среднегодовых значений ОА радона или ЭРОА радона в воздухе помещений для принятия решения о необходимости проведения радонозащитных мероприятий. Однако независимо от целей радиационного обследования эксплуатируемых зданий измерения ОА или ЭРОА радона в них проводятся в штатном режиме и при необходимости могут продолжаться сколько угодно долго. Исходя из этого, можно говорить, что среднегодовые значения ОА радона в воздухе помещений в эксплуатируемых зданиях определяются по данным прямых инструментальных измерений.

В методических подходах к радиационному обследованию новых и эксплуатируемых зданий имеется еще одна принципиальная особенность проведения радиационного контроля, которая связана

с объемом измерений. По понятным причинам измерение ОА или ЭРОА радона в помещениях всех жилых единиц в многоквартирных домах или помещениях общественных и производственных зданий и сооружений не представляется возможным. Очевидно, что объем радиационного контроля новых зданий должен быть минимально необходимым, чтобы при этом одновременно были обеспечены условия гарантированного соответствия здания после сдачи в эксплуатацию установленным гигиеническим нормативам.

Учитывая сказанное, краткое описание методических подходов к радиационному обследованию новых и эксплуатируемых зданий приведено отдельно. При этом отметим, что эти подходы одинаковы для зданий и сооружений жилищного, общественного и производственного назначения, хотя допустимые уровни по среднегодовому значению ЭРОА изотопов радона в них и разные. Кроме того, следует учитывать, что в ОСПОРБ-99/2010 [1] и СанПиН 2.6.1.2800-10 [2] производственные здания фактически разделены на два типа. К первому из них относятся здания, в которых отсутствуют потенциальные источники повышенного облучения работников за счет природных источников излучения.

Ко второму типу следует относить производственные здания и сооружения, в которых организованы и осуществляются технологические процессы, потенциально сопровождающиеся повышенным облучением работников природными источниками излучения. Для таких производств требования по обеспечению радиационной безопасности установлены не по отношению к самим зданиям, а к производственной среде. Методические вопросы контроля уровней облучения работников изотопами радона и их короткоживущими дочерними продуктами распада в воздухе здесь нами не рассматриваются. Их изложение можно найти в [3–5].

### **6.1.1 Радиационное обследование новых зданий для целей оценки их соответствия нормативам по среднегодовому значению ОА радона в воздухе**

Как указано выше, основной целью радиационного обследования зданий и сооружений, сдающихся в эксплуатацию после окончания строительства, капитального ремонта и реконструкции, является

оценка максимально возможного среднегодового значения ОА радона или ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений при последующей их эксплуатации. По своей методологии такое обследование классифицируется как сугубо сертификационные испытания, при проведении которых все присущие им неопределенности трактуются в пользу будущих обитателей, а получаемая при этом оценка должна иметь разумно допустимый уровень консерватизма.

В случае, когда речь идет об оценке среднегодового значения ОА радона в воздухе помещений, основные неопределенности связаны как с природой самого фактора, так и с целым рядом влияющих параметров. Для ОА радона в воздухе помещений характерна значительная вариабельность во времени – сезонная, суточная, кратковременная температурная или ветровая зависимость и т. п., а также в пространстве, которая может быть обусловлена неоднородностью физических и радиологических свойств почв и грунтов под зданием. К этому следует добавить определенные несовершенства, которые присущи нормативному обеспечению – при строительстве зданий могут быть использованы материалы с повышенным вкладом  $^{226}\text{Ra}$  в величину  $A_{\text{эфф}}$  и/или с высоким коэффициентом эманирования радона из строительных изделий и материалов. Возможны также определенные просчеты в проектировании зданий и в процессе строительства (неудовлетворительная работа системы вентиляции помещений, недостаточно качественная газо- и гидроизоляция основания и подземных этажей, вводов коммуникаций и т. п.). Наконец, любые измерения связаны с погрешностью определения величины показателя, которая для современных средств измерений ОА радона и ЭРОА изотопов радона в воздухе на уровне 30–50 Бк/м<sup>3</sup> составляет 30 % или несколько больше.

В Российской Федерации первая методика оценки максимально возможного среднегодового значения ОА радона или ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий при приемке их в эксплуатацию после завершения строительства (реконструкции или капитального ремонта) была представлена в МУ 2.6.1.715-98 [6]. Учет всех неопределенностей при оценке максимального значения среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе в МУ

2.6.1.715-98 был заложен в коэффициент вариации для величины ЭРОА радона, а его численное значение принималось для теплого и холодного сезонов разным с учетом длительности измерений. Выражение для оценки максимально возможного среднегодового значения ЭРОА изотопов радона в воздухе было довольно простым:

$$(\text{ЭРОА}_{Rn} + \Delta_{Rn}) \cdot V_{Rn}(t) + 4,6 \cdot (\text{ЭРОА}_{Tn} + \Delta_{Tn}), \text{ Бк/м}^3, \quad (6.1)$$

где  $\text{ЭРОА}_{Rn}$  и  $\Delta_{Rn}$  – соответственно измеренное значение ЭРОА радона и погрешность измерения, Бк/м<sup>3</sup>;  $\text{ЭРОА}_{Tn}$  и  $\Delta_{Tn}$  – то же для торона;  $V_{Rn}(t)$  – коэффициент вариации для величины ЭРОА радона, отн. ед.

Численное значение коэффициента вариации в зависимости от сезона и длительности измерений принимается по табл. 6.1.

Таблица 6.1.

**Значения коэффициента вариации для разных сезонов года в зависимости от продолжительности измерений**

Продолжительность измерений, t		Менее 1 часа	1 – 3 суток	1 – 2 недели	1 – 3 месяца
Значение $V_{Rn}(t)$	Теплый сезон	3,0	2,3	1,8	1,5
	Холодный сезон	1,5	1,1	0,95	0,75

Следует отметить, что в период подготовки МУ 2.6.1.715-98 в стране фактически отсутствовали систематические сведения о сезонных измерениях ОА и ЭРОА радона в воздухе помещений. При расчетах численных значений коэффициента вариации  $V_{Rn}(t)$  в нашем распоряжении были результаты единичных многомесячных (до одного года) измерений ОА радона в воздухе радон-мониторами типа AlphaGUARD PQ 2000. Довольно скудными были также сведения по краткосрочным и сезонным вариациям ОА радона в воздухе жилых помещений. Поэтому основные сложности при подготовке документа были связаны именно с обоснованием численных значений коэффициента вариации ОА радона.

При подготовке МУ 2.6.1.715-98 кроме значений коэффициента  $V_{Rn}(t)$  большие трудности были связаны с обоснованием условий проведения измерений и необходимого объема контроля при проведении радиационного обследования многоквартирных домов. В числе основных условий, которые должны соблюдаться при проведении измерений, были сформулированы требования по выдержке помещений в закрытом виде не менее 12 часов до начала радоновых измерений. Остальные условия проведения измерений ОА радона и/или ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений касаются выбора мест установки приборов в контролируемых помещениях, метеоусловий в период измерений и т. п. Выбор помещений для измерений ОА радона проводится с учетом их назначения. Как правило, для измерений выбирают помещения, в которых люди проводят наибольшее время.

Наиболее интересными с сегодняшних позиций выглядят требования к объему контроля, которые установлены в п. 3.7 МУ 2.6.1.715-98 в редакции «общий объем контроля ЭРОА радона и торона должен быть достаточным». И далее в тексте пункта уточняется, что число и расположение помещений следует выбирать с учетом категории потенциальной радоноопасности территории, удельной активности радия-226 в строительных материалах, конструктивных особенностей и назначения здания. Важным подспорьем при обосновании объема измерений является Приложение 4 к Методическим указаниям. В нем приведены подробные указания по объему контроля в многоэтажных зданиях.

Введение в практику радиационного обследования зданий жилищного и общественного назначения МУ 2.6.1.715-98 исключительно положительно отразилось на качестве радиационного контроля зданий в последующем. Этому в значительной мере способствовало также принятие менее чем через полгода после утверждения МУ 2.6.1.715-98 Федерального закона «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» [7], которым была введена система обязательного радиационного обследования зданий и сооружений, сдающихся в эксплуатацию после окончания строительства, капитального ремонта или реконструкции. В пункте 3 Статьи 12 Закона указано, что «...ввод в эксплуатацию построенных и ре-

*конструированных объектов допускается при наличии санитарно-эпидемиологических заключений о соответствии таких объектов санитарным правилам», а далее в пункте 1 Статьи 23 Закона указано, что «жилые помещения по... уровню ионизирующих излучений... должны соответствовать санитарным правилам». Требования Закона вместе с определением термина «санитарно-эпидемиологическое заключение» как документа, удостоверяющего соответствие или несоответствие факторов среды обитания, продукции и услуг требованиям санитарных правил, фактически создали механизм обязательного контроля жилых и общественных зданий после окончания их строительства, капитального ремонта или реконструкции.*

Благодаря этому последующее десятилетие вплоть до 2010 г. все вновь построенные жилые и общественные здания перед сдачей их в эксплуатацию подвергались радиационному обследованию, что позволило в работе [8] сделать вывод о значительном снижении уровня содержания радона в воздухе объектов строительства, введенных в эксплуатацию после 2000 г.

Более чем 10-летняя практика радиационного обследования жилых и общественных зданий позволила накопить значительный опыт, а также выявить определенные недостатки в методологии оценки максимальной среднегодовой ЭРОА в воздухе объектов строительства. К тому же за это время произошли серьезные изменения в законодательстве Российской Федерации: были приняты новый Градостроительный кодекс [9] и ФЗ «О требованиях безопасности зданий и сооружений» [10]. Изменениями в ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» был отменена система санитарно-эпидемиологических заключений. Все это послужило основанием для переработки методических подходов к радиационному обследованию зданий и оценки их соответствия установленным требованиям санитарных правил и гигиенических нормативов, которые закреплены в МУ 2.6.1.2838-11 [11].

Как и в МУ 2.6.1.715-98, в новом документе допускается проводить оценку соответствия здания установленным гигиеническим нормативам по среднегодовому ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений по результатам краткосрочных измерений показателя. При

этом оценке верхней границы среднегодового значения ЭРОА изотопов радона в воздухе определяют при обязательном соблюдении целого ряда условий. В частности, в здании должны быть смонтированы и закрыты все окна и двери. Если проектом строительства здания предусмотрена установка системы вентиляции с механическим побуждением, то в период измерений она должна работать в штатном режиме, в здании должны быть приостановлены любые виды работ. И в таком состоянии оно должно быть выдержано не менее 12 часов до начала измерений. С учетом соблюдения этих условий оценка максимального среднегодового значения ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений проводится по формуле:

$$[\text{ЭРОА}_{Rn} + \Delta_{Rn} + 4,6 \cdot (\text{ЭРОА}_{Tn} + \Delta_{Tn})] \cdot K(t, h, v), \text{ Бк/м}^3 \quad (6.2)$$

где  $\text{ЭРОА}_{Rn}$  и  $\Delta_{Rn}$  – соответственно измеренное значение ЭРОА радона и погрешность измерения, Бк/м<sup>3</sup>;  $\text{ЭРОА}_{Tn}$  и  $\Delta_{Tn}$  – то же для торона;  $K(t, h, v)$  – коэффициент сезонности, значение которого принимается равным 1,0 для зимнего периода года и 1,3 – для летнего.

В условии (6.2) допустимое значение среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений производственных зданий и сооружений, сдающихся в эксплуатацию после окончания строительства, капитального ремонта или реконструкции составляет 150 Бк/м<sup>3</sup>. Численное значение коэффициента  $K(t, h, v)$  зависит от целого ряда параметров в период измерений: перепада температур внутри и снаружи здания, атмосферного давления, силы и направления ветра, среднегодовых значений этих параметров, строительных характеристик зданий и т. д. При подготовке новых Методических указаний предполагалось, что значения коэффициента  $K(t, h, v)$  будут определяться для конкретных регионов с учетом специфических особенностей строительства, климатических и иных условий. Однако такие исследования были выполнены только для двух территорий – Санкт-Петербурга и Ленинградской области, а также для территории Ростовской области [8, 12, 13]. Тем не менее, считаем, что идеология МУ 2.6.1.2838-11 по оценке максимальной среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе новых объектов строительства по данным краткосрочных измерений является более обоснованной, чем она была принята в МУ 2.6.1.715-98.

Можно показать, что степень консерватизма при оценке максимальной среднегодовой ЭРОА изотопов радона по МУ 2.6.1.715-98 была достаточно высокой. В самом деле, если считать, что измерения ЭРОА радона проводятся в летнее время, и при этом вклад торона пренебрежимо мал, то условие соответствия здания установленным нормативам по формуле (6.1) выполняется для измеренных значений ЭРОА радона в воздухе помещений не выше 26 Бк/м<sup>3</sup>. В то же время условие соответствия здания нормативу 100 Бк/м<sup>3</sup> согласно формуле (6.2) по методологии МУ 2.6.1.2838-11 выполняется при заметно более высоких уровнях ЭРОА радона в воздухе – до 59 Бк/м<sup>3</sup>.

Отметим также, что в новых методических указаниях установлены более конкретные требования к объему измерений ОА радона и/или ЭРОА изотопов радона в воздухе зданий при сдаче их в эксплуатацию. Главным образом это связано со стремлением в новом российском законодательстве защитить интересы бизнеса. Поэтому при подготовке МУ 2.6.1.2838-11 объем радиационного контроля потребовалось установить минимально необходимым с учетом числа жилых единиц или помещений в зданиях. Кроме того, в них детально описан порядок выбора помещений для контроля содержания радона в воздухе. Важным отличием нового документа является также порядок санитарно-эпидемиологической оценки результатов измерений в разных ситуациях. В частности, если по данным измерений ЭРОА изотопов радона в воздухе отдельных помещений экспрессными методами не выполняется условие (6.2), но при этом для них выполняется условие:

$$\text{ЭРОА}_{Rn} + \Delta_{Rn} + 4,6 \cdot \text{ЭРОА}_{Tn} \leq 100, \text{ Бк/м}^3, \quad (6.3)$$

то для принятия окончательного решения о соответствии (несоответствии) помещений установленным нормативам в документе предписано проведение квазиинтегральных измерений ОА радона с экспозицией не менее 3 суток или многократные измерения экспрессными методами.

### 6.1.2. Радиационное обследование эксплуатируемых зданий для определения среднегодовых значений ОА радона в воздухе помещений

Основная цель радиационного обследования зданий и сооружений при сдаче их в эксплуатацию принципиально отличается от целей обследования эксплуатируемых зданий. Как сказано выше, в первом случае важно по результатам контроля гарантировать, что здание после сдачи в эксплуатацию будет соответствовать установленному нормативу по среднегодовому ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений. Целью радиационного обследования эксплуатируемых зданий и сооружений может быть:

- оценка соответствия текущих среднегодовых уровней ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений установленным гигиеническим нормам;
- определение среднегодовых значений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений для оценки доз облучения населения в коммунальных условиях или работников на рабочих местах.

Как правило, определение среднегодовых значений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений с целью оценки соответствия зданий и сооружений установленным гигиеническим нормам проводится в рамках осуществления текущего санитарно-эпидемиологического надзора органами и организациями Роспотребнадзора, по индивидуальным заявкам владельцев частных домов и квартир, участников рынка недвижимости и т. д. Корректнее всего в таких случаях измерения ОА радона в воздухе помещений для оценки среднегодовых уровней ЭРОА радона проводить интегральными методами в штатном режиме эксплуатации зданий. При этом оценка соответствия здания установленным гигиеническим нормативам фактически может проводиться по формуле (6.2), но без учета коэффициента вариации:

$$\text{ЭРОА}_{Rn} + \Delta_{Rn} + 4,6 \cdot (\text{ЭРОА}_{Tn} + \Delta_{Tn}) \leq 200, \text{ Бк/м}^3, \quad (6.4)$$

где обозначения те же, что и в формуле (6.2). В условии (6.4) допустимое значение среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений эксплуатируемых производственных зданий и сооружений 300 Бк/м<sup>3</sup>.

При определении среднегодовых значений ОА радона или ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений эксплуатируемых зданий и сооружений любого назначения возникают два ключевых момента. Первый из них фактически совпадает с таковым при контроле радона в помещениях как эксплуатируемых, так и новых зданий и связан с выбором помещений для измерений и места установки измерительного оборудования. В жилых единицах (квартиры, индивидуальные дома и т. п.) обычно рекомендуется [6, 11, 14–17] выбирать помещения, в которых жители проводят наибольшее время (спальни, гостиные и т. д.). В производственных зданиях и сооружениях существенно более разнообразным может быть спектр помещений по их функциональному назначению, расположению и числу рабочих мест. Поэтому выбор помещений для измерений в эксплуатируемых производственных зданиях и сооружениях сложнее, чем в жилых зданиях. В таких случаях должна учитываться цель обследования. Если проводится выборочное обследование зданий на конкретной территории, то выбираются помещения, которые наилучшим образом характеризуют здание (более подробно эти вопросы обсуждаются ниже). Если же проводится обследование конкретного здания для оценки доз облучения населения или работников, то в этом случае выбираются помещения с наибольшим временем пребывания людей.

Выбор места для установки средств измерений при экспрессных, интегральных и квазиинтегральных измерениях диктуется в основном тем, чтобы обеспечить сохранность оставленных на длительное время детекторов, а также необходимостью избежать измерений в застойных зонах. Для этого места расположения детекторов и радиометров для экспрессных измерений выбирают на достаточном расстоянии от поверхности ограждающих конструкций помещений [6, 16, 17].

Однако наибольшие сложности в определении среднегодовых значений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений связаны с аппаратным и методическим обеспечением измерений. Еще в [17] было рекомендовано эти измерения проводить интегральными методами, считая, что достаточно точной оценкой среднегодового значения показателя является среднее значение по результатам двух измерений с экспозицией в 2–3 месяца, выполненных в холодный и теплый перио-

ды года. Менее предпочтительной считалась оценка среднегодового значения показателя с использованием квазиинтегральных средств и методов измерений с числом измерений 4–6 в году в каждом помещении в разные сезоны года. Еще меньшее доверие внушает оценка среднегодовых значений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений по данным экспрессных измерений: в [17] для этого рекомендовано выполнить не менее 15 измерений в каждом помещении, равномерно распределенных как в течение суток, так и в течение года.

Практически такая же методология оценки среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений сохранена в [14], однако уже в Методических указаниях МУ 2.6.1.2397-08 [15] предпочтение отдается интегральным средствам и методам контроля содержания радона в помещениях для оценки среднегодового значения ЭРОА изотопов радона в воздухе. При этом считается, что среднегодовое значение ЭРОА радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий должно определяться по данным двух измерений интегральной ОА радона с экспозицией не менее двух месяцев каждое, выполненных в холодное и теплое время года.

Интересный подход к определению среднегодовых значений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений по данным измерений разной продолжительности предложен в Методических указаниях МУ 2.6.1.037-15 [16]. В документе приведен обширный справочный материал, что делает его использование на практике более удобным, введена классификация помещений по типу воздухообмена и приведено описание методических подходов по определению среднегодовых ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений.

Значение среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений ( $ЭРОА_{сг}$ ) на основе результатов измерения ЭРОА в кратко- или среднесрочном режиме (экспозиция до 14 суток) предложено определять по формуле:

$$ЭРОА_{сг} = \frac{ЭРОА_{Rn}}{K_T(\theta)+1} + 4,6ЭРОА_{Tn} , \quad (6.5)$$

где  $ЭРОА_{Rn}$  – измеренное значение ЭРОА радона в воздухе, Бк/м<sup>3</sup>;  $ЭРОА_{Tn}$  – измеренное или среднее значение ЭРОА торона,

Бк/м<sup>3</sup>;  $K_T(\theta)$  – коэффициент температурного влияния, значения которого табулированы, а безразмерная величина  $\theta$  определяется по формуле:

$$\theta = (T_B - T_H)/(T_{CG}^B - T_{CG}^H) - 1, \quad (6.6)$$

где  $T_e$  и  $T_n$  – измеренные значения температуры воздуха внутри помещения и снаружи здания в период измерений соответственно, °С;  $T_{CG}^B$  и  $T_{CG}^H$  – среднегодовая температура воздуха внутри помещения (при отсутствии данных принимается равной + 23 °С) и снаружи здания соответственно, °С.

Значение среднегодовой ОА радона в воздухе помещений ( $OA_{CG}$ ) по результатам двух интегральных измерений ОА радона в теплый и холодный периоды года предложено определять с учетом длительности отопительного и теплого периодов по формуле:

$$OA_{CG} = \eta \cdot OA_{on} + (1 - \eta) \cdot OA_{mn}, \quad (6.7)$$

где  $OA_{on}$  и  $OA_{mn}$  – результаты интегральных измерений ОА радона в воздухе помещений в период отопительного и теплого сезонов года соответственно, Бк/м<sup>3</sup>;  $\eta$  – доля отопительного периода в течение года, значения которого табулированы для большинства регионов страны.

## 6.2. Радоновое обследование территории

Радоновое обследование территории представляет собой массовое измерение ОА радона в жилых зданиях в рамках целостной, скоординированной программы. Обследование может проводиться на территориях размером от небольшого населенного пункта до страны в целом. Цель радонового обследования – установить частотное распределение ОА радона в жилищах территории, определить его форму и рассчитать параметры.

В России методическим основам выборочного обследования для оценки доз облучения населения посвящены методические рекомендации МР 11-2/206-09 [17]. Развернутый обзор методов планирования, организации и проведения радоновых обследова-

ний в мире был подготовлен ведущими специалистами по заданию МАГАТЭ в 2013 г. [18].

При наличии соответствующих ресурсов может выполняться сплошное обследование жилого фонда. Однако в большинстве случаев необходимая информация об уровнях облучения населения может быть получена по результатам обследования выборки помещений. В этом случае говорят о выборочном характере обследования. Выборочное радоновое обследование планируется таким образом, чтобы обеспечить достаточный объем и представительность выборки зданий для достижения требуемой точности и достоверности результатов.

Надежный метод формирования представительной выборки – случайный отбор необходимого числа объектов из их полного перечня. Для обследования жилищ в качестве полного перечня может использоваться реестр жилых помещений или список граждан. Реализации этого подхода может препятствовать отсутствие полного списка. Вместо полного реестра жилищ можно использовать такие источники данных, как список телефонных номеров или регистр работников государственных или частных организаций и предприятий, имеющих широкую сеть учреждений и филиалов.

Нерандомизированная выборка может послужить причиной смещенной оценки параметров распределения ОА радона. Одним из примеров такого формирования выборки является широко распространенная практика привлечения волонтеров для выполнения программ измерений в жилищах. Необходимо принимать во внимание то, что желание участвовать в радоновом обследовании может быть связано с обоснованной обеспокоенностью проблемой радона в своем жилище, т. е. коррелировать с ОА радона. В обзоре МАГАТЭ приводятся свидетельства того, что в домах добровольцев средняя ОА радона выше, чем у случайно выбранных лиц. Привлечение добровольцев не рекомендуется даже в тех случаях, когда можно полагать, что потенциальным участникам не известна информация о вреде радона и основных факторах радоноопасности т. к. социальный и возрастной состав лиц, отозвавшихся на приглашение, опубликованное в средствах массовой информации, может значительно отличаться от соответствующих характеристик населения.

Большая доля отказов случайно отобранных лиц от участия в обследовании также является неприемлемым для формирования представительной выборки на основе рандомизированного подхода. Это связано с тем, что нежелание проводить измерения может быть статистически связано с предполагаемым невысоким уровнем ОА радона, например, в квартирах на верхних этажах. Поэтому МАГАТЭ рекомендует пытаться максимально снизить число отказов, используя повторные обращения к гражданам и т. п.

Для снижения доли отказов может применяться подход, основанный на привлечении к проведению обследования персонала учреждений и предприятий [20]. Для этого намечается сеть учреждений, относительно равномерно распределенных по территории населенного пункта с относительно большим количеством работников. К таким учреждениям могут относиться санитарно-гигиенические учреждения, школы, детские сады. При выборе учреждения учитываются требования представительного формирования выборки. Измерения объемной активности радона выполняются в домах у определенного числа сотрудников отобранных учреждений. Такой подход относится к квази-рандомизированным, что необходимо учитывать при обработке результатов обследования [20]. В частности, следует ожидать, что в созданной таким образом группе будет наблюдаться меньшая вариативность типов зданий и режима содержания помещений.

Смещенная оценка уровня облучения населения будет также получена, если в выборке непропорционально представлены территории с высоким радоновым потенциалом или типы помещений с повышенным поступлением радона, например, расположенные на первом этаже. Такой подход к формированию выборки иногда применяют, когда уже на этапе первоначального радонового обследования пытаются решать задачу выявления зданий с повышенным содержанием радона.

Критерием представительности созданной выборки жилых зданий служит соответствие ее характеристик жилому фонду в целом. Поэтому в качестве одной из задач выборочного радонового обследования является сбор данных о помещениях, в которых проводятся измерения, и информации о характеристиках жилого фонда терри-

тории. Представительность выборки оценивается по тому, насколько пропорционально в ней представлено население, проживающее в различных типах зданий и географо-административных районах исследуемой территории. При характеристике типа здания учитываются основные известные признаки радоноопасности – тип перекрытий, этаж, этажность здания, материал стен, наличие подвала под зданием и др. Современные многоэтажные здания, построенные с применением технологий сбережения тепла, необходимо рассматривать как отдельную группу. Также следует учесть характеристики содержания помещения – тип проветривания и отопления, количество жильцов, тип остекления и др. Представительность выборки может оцениваться при планировании и обязательно анализируется на завершающем этапе обследования.

Объем выборки обследования определяется исходя из необходимой точности оценки среднего арифметического, среднего геометрического и логарифмического стандартного отклонения в выборке, а также процентилей распределения. Адекватную и достаточно определенную оценку среднего значения ОА радона в жилищах можно получить, проведя измерения в относительно небольшой выборке помещений. Для оценки частотного распределения ОА радона требуется большее количество измерений. Кроме того, чем больше объем выборки, тем меньше вероятность того, что она окажется непредставительной. В справочной публикации МАГАТЭ в качестве достаточного размера выборки национального радонового обследования приводится диапазон от нескольких сотен до нескольких тысяч помещений (МАГАТЭ, IAEA/AQ/33, 2013 г.) [18]. В качестве примера можно привести национальные радоновые обследования Великобритании и США, где объем выборки составил около 2000 и менее 6000 жилищ соответственно [18, 19]. В методических рекомендациях МР 11-2/206-09 [17] объем выборки обследуемых жилых единиц (квартир и односемейных жилых домов) предлагается устанавливать из расчета не менее 1% от их общего числа в регионе. В населенных пунктах с малым числом жителей плотность выборки рекомендуется увеличивать исходя из условия, чтобы в каждом населенном пункте по возможности было обследовано не менее 20 жилых единиц. Для детального

анализа географического распределения уровней облучения и картирования ОА радона необходимо большее число измерений.

Наиболее подходящим средством измерения в рамках радонового обследования являются твердотельные трековые детекторы, которые достаточно дешевы, просты, имеют небольшие размеры, могут рассылаться по почте и подходят для долгосрочных измерений. Для целей радонового обследования территории необходимо в каждом жилище проводить измерения продолжительностью от нескольких месяцев до одного года.

В случае если общая продолжительность измерений в помещениях составит менее одного года, необходимо оценить среднегодовую величину ОА радона. Анализ закономерностей изменения ОА радона в зависимости от сезона измерения или средней температуры атмосферного воздуха за период измерения представляет собой самостоятельную исследовательскую задачу, которая также может решаться в рамках радонового обследования. Использование данных о сезонных вариациях в других регионах является дополнительным источником ошибки.

Анализ результатов обследования во многом строится на предположении, что распределение ОА радона в выборке хорошо описывается логнормальной функцией. Такая форма распределения определяется мультипликативной комбинацией факторов, определяющих конвективное и диффузионное поступление радона в здания. Некоторое отклонение от логнормальности можно связать с тем, что ОА радона зависит от суммы влияния этих двух механизмов, а также инфильтрации атмосферного воздуха.

Логнормальное распределение полностью описывается двумя параметрами:

1) среднее геометрическое,  $GM$ , которое рассчитывается по формуле:

$$GM = \sqrt[N]{\prod_{i=1}^N x_i} \quad (6.8)$$

или

$$GM = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^N \ln(x_i)}{N}\right), \quad (6.9)$$

где  $x$  – случайная величина, принимающая значения  $x_i$ ,  $N$  – объем выборки;

2) логарифмическое стандартное отклонение,  $\lambda_{LN}$ :

$$\lambda_{LN} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\ln(x_i) - \ln(GM)]^2}{N-1}}. \quad (6.10)$$

Вместо этого параметра часто используют геометрическое стандартное отклонение, GSD:

$$GSD = \exp(\lambda_{LN}). \quad (6.11)$$

В случае логнормального распределения «правило двух сигм» применяется к среднему геометрическому и геометрическому стандартному отклонению, например, 95,4 % значений находятся в интервале от  $GM/GSD^2$  до  $GM \times GSD^2$ . Кроме того, параметры логнормального распределения связаны со средним арифметическим (AM) следующим соотношением:

$$AM = \exp\left(\ln(GM) + \frac{\ln(GSD)^2}{2}\right). \quad (6.12)$$

С использованием известных параметров логнормального распределения можно оценивать долю жилищ, в которых ОА радона превышает некоторый нормируемый или референтный уровень. Такие расчеты удобно делать с использованием математического программного обеспечения. В случае если ОА радона превышает норматив в небольшом количестве помещений выборки, расчетная оценка этого числа, сделанная на основе предположения о логнормальном распределении, будет более надежной.

Свойства логнормального распределения позволяют применять классические параметрические методы статистического анализа. Например, с использованием дисперсионного анализа можно проанализировать достоверность различий средних значений логарифма ОА

радона в подгруппах зданий, различающихся по какому-либо признаку. При этом необходимо учитывать, что величина  $\lambda_{LN}$  в подгруппах могут также различаться, что особенно заметно проявляется при сравнении результатов измерений на территориях с различным геогенным радоновым потенциалом.

Обобщенный анализ результатов выборочного радонового обследования включает:

- оценку представительности выборки;
- построение таблицы и графика частотного распределения ОА радона;
- проверку статистической гипотезы о логнормальном распределении ОА радона в выборке;
- расчет параметров логнормального распределения;
- расчет среднего арифметического значения ОА радона и стандартной ошибки этой величины;
- оценку доли жилищ, в которых ОА радона превышает принятые референтные уровни;
- оценку вклада различных факторов (тип здания, режим содержания помещения и др.) в варибельность ОА радона.

По результатам выборочного радонового обследования проводится анализ масштаба проблем, связанных с облучением радоном на рассматриваемой территории, и значимость ущерба от радона для общественного здравоохранения. Такой анализ включает:

- оценку доз облучения населения за счет радона и место радона в структуре доз облучения населения за счет всех источников ионизирующего излучения;
- оценку риска и ущерба от заболеваемости раком легкого, связанной с радоном, и сравнительный анализ вклада различных факторов риска в общую заболеваемость;
- обоснование референтного уровня объемной активности радона и оценку числа жилищ, в которых этот уровень превышен;
- планирование детальных обследований жилого фонда в зонах повышенного геогенного радонового потенциала и в зданиях с другими признаками радоноопасности с целью

- выявления помещений, в которых ОА радона превышает нормируемый или референтный уровень;
- анализ эффективности различных стратегий проведения радонозащитных мероприятий и оптимизации защиты населения от облучения радоном.

Эффективность стратегии защиты населения от радона и принятых радонозащитных мероприятий оценивается на основе сравнения начального и достигнутого распределений объемной активности радона в жилищах. Для этих целей может проводиться повторное выборочное радоновое обследование.

### *Литература*

1. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010) // Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. – 2010.
2. Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения // Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2800-10. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. – 2011.
3. Радиационный контроль на предприятиях огнеупорной промышленности // Методические рекомендации по обеспечению радиационной безопасности МР 11-2/221-99. – М.: Минздрав России. – 2000.
4. Форма федерального государственного статистического наблюдения № 4 – ДОЗ. Сведения о дозах облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона // Методические рекомендации МР 2.6.1.0088-14. – М.: Федеральный Центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. – 2015.
5. *Стамат И.П.* Система гигиенических требований по ограничению облучения населения Российской Федерации природными источниками излучения / *И.П. Стамат* // Автореферат дис-

- сертации на соискание ученой степени доктора биологических наук. – СПб. – 2012.
6. Проведение радиационно-гигиенического обследования жилых и общественных зданий // Методические указания МУ 2.6.1. 715-98. – СПб. –1998.
  7. О санитарно-эпидемиологическом благополучии: Федеральный закон Российской Федерации № 52-ФЗ от 30.03.1999 г. Принят Государственной Думой 12 марта 1999 г.
  8. *Горский Г.А.* О необходимости радиационного обследования зданий после окончания строительства, капитального ремонта или реконструкции / *Г.А. Горский, А.В. Еремин, И.П. Стамат* // Радиационная гигиена. – Т. 3, № 1. – С. 28–33.
  9. Градостроительный кодекс Российской Федерации: Федеральный закон Российской Федерации № 190-ФЗ от 29.12.2004 г. Принят Государственной Думой 22 декабря 2004 г.
  10. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: Федеральный закон Российской Федерации № 384-ФЗ от 30.12.2009 г. Принят Государственной Думой 23 декабря 2009 г. Москва, 30 декабря 2009 г..
  11. Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после окончания их строительства, капитального ремонта, реконструкции по показателям радиационной безопасности // Методические указания. МУ 2.6.1.2838-11. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. – 2011.
  12. *Соловьев М.Ю.* Содержание радона в воздухе вновь построенных и эксплуатируемых зданий в Ростовской области / *М.Ю. Соловьев, М.В. Калинина, И.П. Стамат* // Радиационная гигиена. 2010. Т. 3, № 2. С. 62–66.
  13. Стамат И. П. Обоснование методики оценки среднегодового значения ЭРОА изотопов радона в воздухе зданий после окончания строительства / *И.П. Стамат, И.А. Ракитин, Г.А. Горский* [и др.] // Радиационный контроль. Радиохимические методы исследования: матер. науч.-практ. конф. – СПб., 2010. С. 89-95.
  14. Оценка индивидуальных эффективных доз облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения //

- Методические указания. МУ 2.6.1.1088-02. – М.: Минздрав России, 2002.
15. Оценка доз облучения групп населения, подвергающихся повышенному облучению за счет природных источников ионизирующего излучения // Методические указания. МУ 2.6.1.2397-08. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. – 2008.
  16. Определение среднегодовых значений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений по результатам измерений разной длительности // Методические указания. МУ 2.6.1.037-2015. – М.: ФМБА России. – 2015.
  17. Выборочное обследование жилых зданий для оценки доз облучения населения // Методические рекомендации. МР 11-2/206-09. – М.: Минздрав России. – 2000.
  18. IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications Series No. 33. National and Regional Surveys of Radon Concentration in Dwellings Review of Methodology and Measurement Techniques // IAEA. – Vienna: IAEA. – 2013.
  19. SSG-32. Specific Safety Guide. Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation // IAEA. – Vienna: IAEA. – 2015.
  20. *Маренный А.М.* Методические аспекты измерений средней объемной активности радона в помещениях интегральным трековым методом / *А.М. Маренный* // АНРИ. – 2012. № 4. – С. 13–19.

**Глава 7**  
**РЕГУЛИРОВАНИЕ ЗАЩИТЫ НАСЕЛЕНИЯ ОТ РАДОНА**  
**И ДОЧЕРНИХ ПРОДУКТОВ РАСПАДА**  
**(С.М. Киселев, И.П. Стамат)**

*В* первой части главы рассматриваются современные взгляды на регулирование защиты населения от радона и дочерних продуктов распада, разработанные такими авторитетными международными организациями, как НКДАР ООН, ВОЗ, МКРЗ и МАГАТЭ. Принятое в данной главе изложение этих взглядов соответствует сложившейся последовательности их формирования указанными международными организациями. Приведены обширные сведения о практике решения радоновой проблемы в странах Европы, США и Канады, при изложении которых обращено внимание на эволюцию взглядов в свете новых рекомендаций международных организаций. Во второй части главы описаны динамика развития и современное состояние отечественной системы регулирования защиты населения от облучения радоном. Подчеркивается, что созданная система носит комплексный характер, поскольку регулирующие мероприятия учитывают воздействие других природных источников ионизирующего излучения. Приведены сведения о масштабах радоновой опасности для нашей страны, полученные в результате сбора данных по дозам природного облучения населения в рамках ЕСКИД. Представлена классификация уровней облучения населения природными источниками излучения и изложены требования по ограничению облучения населения за счет радона в производственных и коммунальных условиях.

## **7.1. Международный опыт регулирования**

### **7.1.1. Роль международных организаций в развитии современных подходов к регулированию защиты населения от радона**

#### **Деятельность НКДАР ООН по научной оценке последствий воздействия радона на население**

С начала своей деятельности НКДАР ООН, постоянно анализируя облучение населения Земли естественными источниками излучения, отмечает, что вклад радона и его короткоживущих продуктов распада является наибольшим. В докладах Комитета указывается, что вдыхание короткоживущих продуктов распада радона и в меньшей степени торона является основным путем облучения легкого. Это облучение приводит к возникновению рака легкого [1, 2].

Современные оценки состояния проблемы отражены НКДАР ООН в докладе 2006 г. [2]. В нем подробно рассмотрены потенциальные источники облучения радоном работников и населения, а также современные проблемы дозиметрии этого радиоактивного газа. В докладе проанализированы экспериментальные результаты по изучению механизмов канцерогенеза на клеточном и субклеточном уровнях, а также в исследованиях на животных. Большое внимание уделено современным результатам эпидемиологических обследований шахтеров и населения и оценкам риска, связанного с облучением радоном. При этом отмечается, что рак легкого – это наиболее распространенное злокачественное заболевание и ведущая причина смерти от рака во всем мире. Подчеркивается, что главной причиной заболевания является табакокурение, а также указывается на связь его возникновения с воздействием асбеста, загрязнением воздуха, диетой и рядом других факторов. Комитет отмечает, что учет этих обстоятельств требует особого внимания при оценке роли и места радона как одного из многих факторов возникновения рака легкого.

Доклад НКДАР ООН 2006 г. построен на оценках предыдущего доклада, выпущенного в 2000 году [1], в который дополнительно внесены результаты анализа новых публикаций, по оценке связи рака

легкого с воздействием радона. Особое место в докладе уделено всесторонней оценке результатов эпидемиологических исследований, на основе которых была установлена связь рака легкого с облучением вдыхаемого радона. С этой целью вначале рассмотрены эпидемиологические данные разных авторов об оценках риска рака легкого при облучении радоном внутри помещений, которые были выполнены методом случай-контроль. При этом обращено внимание на учет таких факторов, как недельная и сезонная вариабельность радона, ошибки в оценке экспозиции и их источники, курение, воздействие асбеста, места и длительность проживания, зависимость от возраста и пола. Особое внимание было уделено вопросам статистической мощности, критериям качества и оценкам неопределенностей этих исследований для того, чтобы проанализировать ошибочные результаты из-за различного рода смещений или мешающих факторов.

Отдельный раздел доклада посвящен анализу географических корреляционных («экологических») исследований, информация о которых была ранее представлена в главе 3 (раздел 3.1). В докладе НКДАР ООН отмечено, что крупные экологические исследования, подобные работам Б. Коэна [3–13], показывающие обратную зависимость между усредненной по округу (территориальная единица в США) радоновой экспозицией и смертностью от рака легкого, по-прежнему вызывают споры. Кроме того, отмечено, что «экологические» исследования подвержены особым смещениям, имеют ряд методических трудностей, в частности, они не позволяют вводить поправки на мобильность и склонность к курению. В отличие от корреляционных исследований, объединенные исследования учитывают как контроль индивидуальных экспозиций, так и склонность к курению и обеспечивают прочную методическую основу для оценки рисков, связанных с облучением от радона в жилых домах.

Используя критерии качества эпидемиологических исследований, НКДАР ООН проанализировал оценки риска рака легкого при облучении радоном в домашних условиях, выполненные методом случай-контроль различными исследователями, начиная с 90-х годов прошлого века. Подавляющее большинство результатов этих исследований представлено в обобщенном виде Baysson и Tirmarche [14] и

приведено в докладе Комитета Генеральной Ассамблеи ООН в 2008 году [2].

Baysson и Tirmarche [14] показали, что результаты проведенных исследований позволили выявить положительную связь между риском рака легкого и объемной активностью радона в жилищах (дополнительный относительный риск (ДОР) 0,06–0,09 на 100 Бк/м<sup>3</sup>). Вместе с тем, при рассмотрении этих результатов Комитет [15–40] отмечает, что их статистическая мощность различна вследствие влияния таких факторов, как размер выборки и качество данных, среди которых приоритетное место занимают неопределенности в оценке экспозиции и эффектов курения (активного и пассивного). Уменьшение влияния этих неопределенностей было достигнуто при анализе объединенных европейских [41, 42], североамериканских [43, 44] и китайских [45] эпидемиологических исследований. Комитет детально рассмотрел результаты этих исследований, в которых приведены оценки относительного риска рака легкого в зависимости от средне-взвешенной по времени объемной активности радона в жилищах.

На основании анализа эпидемиологических данных, стратифицированных по возрасту, региону проживания и привычкам к курению, был сделан вывод [2], что «объединенные анализы эпидемиологических исследований» облучения радоном в жилищах четко демонстрируют риски рака легкого от облучения радоном и дают прямую основу для оценки риска в домах от такого облучения. Оценки прироста риска возникновения рака легкого на единицу экспозиции в трех совместных анализах оказались очень близкими и статистически не различимыми: полученные значения составляют 1,08, 1,10 и 1,13 на 100 Бк/м<sup>3</sup> для Европы, Северной Америки и Китая соответственно. Общая для Европы, Северной Америки и Китая оценка составила 1,09 на 100 Бк·м<sup>-3</sup>». НКДАР ООН также считает, что «в настоящее время представляется обоснованным принять оценку Darby с соавт. [41,42] с поправкой на случайные погрешности определения объемных активностей радона, а именно: величину дополнительного относительного риска – 0,16 (95 % доверительный интервал (ДИ): 0,05; 0,31) на 100 Бк/м<sup>3</sup>, как подходящую, возможно консервативную, оценку (пожизненного) риска от радона в жилищах».

Эта научная оценка используется международными организациями, предметом деятельности которых является разработка рекомендаций и стандартов безопасности в области радиационной защиты населения от воздействия радона.

По результатам данного доклада в 2009 году НКДАР ООН было сделано заявление на сессии Генеральной Ассамблеи ООН о том, что есть установленное прямое доказательство, подтверждающее обнаруживаемый риск рака легкого для населения от радона в жилищах [46].

### **Деятельность ВОЗ по изучению проблемы воздействия радона на организм человека**

Всемирная организация здравоохранения, разрабатывая проблемы первичной профилактики возникновения заболеваний при воздействии вредных факторов окружающей среды, обратила внимание на необходимость изучения качества воздуха в закрытых помещениях. В 1979 году ВОЗ, рассматривая результаты европейской рабочей группы по качеству воздуха в закрытых помещениях, впервые отметила влияние на последствия для здоровья воздействия радона в жилых помещениях [47]. При этом было указано, что эффекты воздействия радона на здоровье человека в закрытых помещениях нельзя рассматривать абстрактно, без оценки качества атмосферного воздуха в жилище. Это связано с тем, что наличие в нем других загрязнителей (например, таких как асбест, тяжелые металлы, стойкие органические загрязнители и т. п.) может оказывать синергическое действие при поступлении радона в организм человека.

В 1988 году Международное агентство по исследованию рака отнесло радон к соединениям, классифицируемым как канцероген для человека. В 1993 году Всемирной организацией здравоохранения был организован международный семинар, в котором приняли участие ученые и эксперты по радону из Европы, Азии и Северной Америки. На семинаре были сделаны первые шаги по обсуждению унифицированного подхода к вопросам регулирования облучения радоном и информирования общественности о связи облучения радоном с риском для здоровья населения [48]. Накопление новых данных по прямым оценкам риска для населения, полученным без экстраполяции имею-

щихся параметров риска для изученных когорт шахтеров [14,41–45], инициировало во многих странах развитие соответствующих защитных мероприятий.

Для определения эффективных стратегий, направленных на снижение радоновой опасности, ВОЗ в 2005 году было начато выполнение Международного радонового проекта [48–50]. Был разработан вопросник, ответы на который позволяли получить информацию о характере и объемах проводимых измерений радона, превентивных мерах и корректирующих действиях, об осведомленности общественности о последствиях его долгосрочного воздействия. В ходе анализа предполагалось изучить приведенные в мировой литературе данные о результатах эпидемиологических исследований и оценить радиационные риски, связанные с заболеваемостью раком легкого и концентрацией радона, находящегося в атмосферном воздухе жилых помещений. Кроме того, в задачи проекта входило определение и разработка мероприятий по повышению осведомленности общественности о последствиях его долгосрочного воздействия.

Для решения этих задач были привлечены эксперты различных организаций из более 40 государств-членов ВОЗ, которые составили партнерскую сеть международного проекта. Были сформированы рабочие группы, которые собирали и анализировали информацию о методах оценки риска при облучении населения радоном в закрытых помещениях, о национальной политике, проводимой в отношении радона, о профилактических и реабилитационных мероприятиях по смягчению действия радона, а также деятельности по информированию общественности о радоновых рисках.

На разосланный в рамках данного проекта вопросник 35 стран представили ответы, в том числе Российская Федерация. На основании оценки результатов опроса была обобщена информация о средних уровнях радона в различных странах (табл.7.1). Основываясь на представленных 26 странами репрезентативных данных, оценка средних значений объемной активности радона в закрытых помещениях составляет около  $64 \text{ Бк/м}^3$ , при этом в Чешской Республике и Ирландии это значение оценивается на уровне  $100 \text{ Бк/м}^3$  [49, 50].

Таблица 7.1.

**Среднегодовые уровни содержания радона  
в воздухе помещений стран Европы**

<http://www.interflow.co.uk/overview-radon-surveys-europe/>

Страна	Среднегодовые уровни (Бк/м <sup>3</sup> )	% жилых помещений >200 Бк/м <sup>3</sup>	% жилых помещений >400 Бк/м <sup>3</sup>
Албания	—	—	—
Австрия	97	8	4
Бельгия	48	1,7	0,3
Хорватия	68	5,4	1,8
Кипр	19	0	0
Чехия	140	10-15	2-3
Дания	53	2,7	0,2
Эстония	60	2-2,5	0,3-0,5
Финляндия	120	8,7	3,6
Франция	63	6,5	2
Германия	50	2,5	<1
Греция	55	2	1,1
Венгрия	—	5,1	0,8
Ирландия	89	6	1,5
Италия	70	3,2	0,9
Латвия	—	—	—
Литва	55	2,5	0,3
Люксембург	115	—	3
Мальта	40	0	0
Нидерланды	23	0,3	0
Норвегия	89	6	3
Польша	49	1,6	0,4

Окончание таблицы 7.1.

Страна	Среднегодовые уровни (Бк/м <sup>3</sup> )	% жилых помещений >200 Бк/м <sup>3</sup>	% жилых помещений >400 Бк/м <sup>3</sup>
Румыния	45	—	—
Сербия-Черногория	144	18	4
Словакия	108	14	11
Словения	87	5,5	2
Испания	90	4	2
Швеция	108	6-7	3-4
Швейцария	77	10	7
Великобритания	20	0,4	0,1

В ходе выполнения проекта получены сведения об особенностях регулирования проблемы облучения населения радиоактивным газом в помещениях в различных странах. В большинстве стран, участвующих в опросе (77 %), в качестве нормируемого показателя для эксплуатируемых помещений установлен уровень действия в диапазоне 200–400 Бк/м<sup>3</sup>, который представляет собой пороговое значение объемной активности радона в жилище, превышение которого определяет необходимость планирования и осуществления корректирующих действий (Табл.7.1). Вместе с тем, практика нормирования радиоактивного газа и проведения соответствующих исследований для контроля уровней содержания радона в помещениях при приемке новых зданий в эксплуатацию применялась эпизодически среди стран-участниц опроса. Результаты опроса позволили также проанализировать информацию о методах измерения радона, особенностях корректирующих действий и профилактических мер, направленных на снижение его объемной активности в помещениях. Только 12 из опрошенных стран (около 40 %) сообщили о наличии национальных стандартов или руководящих принципов по проведению подобного рода работ. По данным опроса, в большинстве стран для оценки сред-

негодовых уровней содержания радона в помещениях применяется метод интегральной трековой радиометрии.

В ходе опроса была собрана информация о различных мероприятиях и подходах по информированию различных аудиторий населения о радоновых рисках: широкая общественность, семьи, проживающие на территориях с высокими уровнями радона, профессиональные группы и органы государственной власти. В 10 странах, где проводились оценки восприятия и отношения общественности к радоновым рискам, были получены различные результаты. Опыт местных и региональных организаций в Швеции, занимающихся этой проблемой, показывает, что информирование общественности приводит к увеличению числа измерений концентраций радона. В Чешской Республике только 25 % респондентов никогда не слышали о радоне, 75 % убеждены в его опасности, при этом 10% не имели правильного понимания проблемы. Исследования в Бельгии показали, что респонденты обычно знали о радоне и причисляли его к риску второстепенного порядка, но три четверти респондентов при этом чувствовали, что риски для здоровья от радона следует принимать всерьез. Отсутствие осведомленности о радоне в Швейцарии и Нидерландах ассоциировалось с отсутствием беспокойства. В Норвегии письма домовладельцам и информация в местных газетах были признаны наиболее важными каналами информирования общественности. С другой стороны, половина владельцев домов в Великобритании не читали листовки о радоне. Пожилым людям, пенсионерам и лицам с более высоким уровнем доходов эта информация была, скорее всего, интересна. Было установлено, что основным сдерживающим фактором активного участия в решении радоновой проблемы является стоимость работ по снижению концентраций радона в жилищах [49, 50].

В рамках радонового проекта была изучена зависимость заболеваемости раком легкого от уровня облучения радонем в жилищах. Рассматривались результаты мировых эпидемиологических исследований, выполненных методом «случай-контроль» [41–45]. На основе этой информации был проведен объединенный анализ полученных данных, основным итогом которого продемонстрировал наличие канцерогенного эффекта воздействия радона при уровнях его объемной

активности радона в жилищах, не превышающих 50–100 Бк/м<sup>3</sup>. Было отмечено, что облучение радоном увеличивает риск заболевания раком легкого для всего населения. Доля радон-индуцированных случаев рака легкого в общей структуре данной патологии находится в диапазоне от 3 до 14 %. Большинство радон-индуцированных раков легкого обусловлено скорее пролонгированным воздействием низких и средних концентраций радона, нежели высоких. Подробное описание результатов проекта приведено на сайте ВОЗ: [http://www.who.int/ionizing\\_radiation/env/radon/en/](http://www.who.int/ionizing_radiation/env/radon/en/).

По итогам выполненного в 2005–2008 гг. Международного радонового проекта в 2009 году было подготовлено и издано Руководство ВОЗ по радону в жилищах [51]. Руководство ориентировано на оценку воздействия радона в жилищах с точки зрения общественного здоровья. В нем приведены данные о последствиях для здоровья, обусловленных присутствием радона в воздухе жилых помещений, и сделан вывод, что радон в воздухе помещений ответственен за значительное число раковых заболеваний легкого среди населения. Для многих стран радон – это вторая по значимости причина рака легкого после курения. В Руководстве рассмотрены современные средства и методы измерения радона в воздухе помещений, а также стратегии мер противорадовой защиты, направленных на снижение его концентраций как в строящихся, новых, так и существующих зданиях. При этом обсуждены вопросы экономической эффективности реализуемой политики в области противорадовой защиты в аспекте разработки новых, менее затратных путей снижения радонового риска. Особое место в публикации уделено вопросам повышения информированности общественности о радоновых рисках, поскольку до настоящего времени проблема радона недостаточно известна населению и политикам. Вследствие этого радон может восприниматься ими как несущественный фактор риска для здоровья. На основании этой информации даются рекомендации в отношении национальной политики по вопросам радона, включая подготовку и реализацию национальных радоновых программ. Подробную информацию о содержании Руководства ВОЗ по радону в жилищах можно найти на сайте ВОЗ.

На основании изложенного можно констатировать, что Всемирная организация здравоохранения рассмотрела защиту населения от радона как проблему общественного здравоохранения. Оценив опасность радона как вредного для здоровья фактора среды обитания, ВОЗ предложила комплекс мероприятий по профилактике возникновения заболеваний, связанных с его воздействием, объединенных в единый план действий. Обобщенные выводы и оценки ВОЗ приведены ниже [51]:

- эпидемиологические исследования подтверждают, что радон в домах увеличивает риск заболевания раком легкого для всего населения. Другие последствия для здоровья от радона не были убедительно продемонстрированы.
- доля всех обусловленных радоном случаев рака легкого принадлежит диапазону от 3 до 14 %.
- во многих странах радон является второй по значимости причиной рака легкого после курения. Радон с гораздо большей вероятностью может вызвать рак легкого у курящих или куривших в прошлом, чем у никогда не куривших. Однако он является основной причиной рака легкого у никогда не куривших людей.
- не существует известного порога объемной активности (ОА), ниже которого радоновое облучение не представляет никакой опасности.
- большинство радон-индуцированных раков легкого обусловлено скорее низкими и средними уровнями ОА радона, чем высокими, потому что воздействию высоких концентраций радона, в общем, подвергается меньшее количество людей.

### **Рекомендации МКРЗ по регулированию защиты населения от облучения радоном**

Разработка первых рекомендаций МКРЗ по радиологической защите от радона была инициирована в середине прошлого столетия и связана с результатами первых эпидемиологических исследований, проведенных в 60-х гг. прошлого столетия, подтвердивших связь облучения радоном шахтеров с развитием рака легкого [1, 2]. Для обе-

спечения безопасности персонала урановых рудников от воздействия радона были разработаны рекомендации по ограничению ингаляционного поступления радона в организм человека [52–54]. Последующие исследования, проведенные в жилых помещениях, показали, что радон вносит существенный вклад в облучение населения [55]. Эти результаты стали основой для выпуска базовых рекомендаций МКРЗ изложенных в Публикации 65 (МКРЗ 65, 1993) [56]. В документе был сформулирован единый подход к защите населения от радона в жилищах и на рабочих местах. При этом оценки риска для населения были получены путем экстраполяции параметров риска, полученных в исследованиях среди шахтеров. Регулирование осуществлялось путем установления уровней действия (объемная активность радона – 600 Бк/м<sup>3</sup> в жилищах и 1500 Бк/м<sup>3</sup> на рабочих местах), превышение которых диктовало необходимость применения мер по снижению содержания радона в помещениях. Таким образом, ранние подходы МКРЗ базировались на концепции защиты наиболее облучаемых групп населения. В соответствии с этими рекомендациями МКРЗ и стандартами безопасности МАГАТЭ (1996) в различных странах были введены нормативы на содержание радона в жилищах. После выхода Публикации 65 МКРЗ важность проблемы регулирования облучения населения радоном была широко воспринята в различных странах мира. Это, в свою очередь, инициировало проведение широкомасштабных национальных радоновых обследований (табл.7.2) и интенсивное изучение эффектов воздействия радона на здоровье населения.

*Таблица 7.2.*

**Масштабы радоновых исследований в Европе**  
 (<http://www.interflow.co.uk/overview-radon-surveys-europe>)

Страна	Население (x10 <sup>6</sup> )	Число исследуемых жилых помещений
Албания	3,6	110
Австрия	8,2	16000
Бельгия	10,4	9000
Хорватия	4,5	782

Окончание таблицы 7.2.

Страна	Население (x10 <sup>6</sup> )	Число исследуемых жилых помещений
Кипр	0,8	84
Чехия	10,2	150000
Дания	5,4	3120
Эстония	1,3	515
Финляндия	5,2	73074
Франция	60,7	12261
Германия	82,4	>50000
Греция	10,7	1277
Венгрия	10,0	15602
Ирландия	4,0	11319
Италия	58,1	5361
Латвия	2,3	300
Литва	3,6	400
Люксембург	0,5	2619
Мальта	0,4	90
Нидерланды	16,4	1846
Норвегия	4,6	51925
Польша	38,6	4098
Португалия	10,6	3317
Румыния	22,33	567
Сербия-Черногория	10,8	968
Словакия	5,4	4019
Словения	2,0	2512
Испания	40,3	5600
Швеция	9,0	500000
Швейцария	7,5	55000
Великобритания	60,4	450000

С 80-х гг. прошлого века в Европе, Северной Америке и Китае [41–45] были выполнены эпидемиологические исследования в

жилищах методом случай-контроль. По результатам этих исследований впервые были проведены прямые оценки риска для населения без необходимости экстраполяции параметров риска, полученных в исследованиях среди шахтеров. Как отмечалось ранее, были изданы в 2006 г. научный доклад НКДАР ООН [2] и в 2009 г. Руководство ВОЗ по радону в жилищах [51], в которых проанализированы новые данные и приведены современные оценки эффектов облучения радоном. Эти обстоятельства обусловили необходимость пересмотра рекомендаций МКРЗ, изложенных в Публикации 65, и инициировали выпуск Заявления Главной комиссии МКРЗ по радону (Португалия, Порто, ноябрь 2009 г.) [57], в котором рекомендовалось снизить нормируемые значения по объемной активности радона в жилищах. Была сформирована рабочая группа с целью разработки новых рекомендаций по защите от радона взамен Публикации 65 [56]. В качестве научной и методической основы разрабатываемого документа использованы материалы Международного радонового проекта ВОЗ [49, 50], научные оценки НКДАР ООН [1, 2], предыдущей Публикации 65 [56], а также Публикаций 101 [58] и 103 [59], Заявление Главной комиссии по радону [57].

В 2010 г. МКРЗ выпустила Публикацию 115 «Риск возникновения рака легкого при облучении радоном и продуктами его распада» [57]. В ней на основе анализа эпидемиологических данных проведена переоценка показателей номинального риска заболеваемости раком легкого при облучении радоном. При этом были учтены только исследования, выполненные по принципу случай-контроль, как дающие наиболее надежные результаты. В итоге показано, что номинальный риск возникновения легочной онкопатологии при облучении радоном в жилищах в два раза превышает аналогичный показатель, принятый в Публикации 65. Результаты эпидемиологических исследований в жилищах послужили научно-практической основой для пересмотра не только количественных показателей нормируемой величины, но и методологии защиты населения от данного источника природного облучения [57], в основу которой новая система радиационной защиты, постулированная в Публикации 103 МКРЗ. В частности, облучение населения радоном рассматривалось с позиции ситуации существу-

ющего облучения [59]. Подходы к регулированию данной ситуации облучения базируются на установлении референтных уровней и применении принципа оптимизации при принятии и реализации соответствующих мер защиты. Концепция референтного уровня отличается от концепции уровней действия. По мнению МКРЗ и ВОЗ, подход, при котором меры по снижению содержания радона в помещениях рекомендовались только в случае превышения уровней его действия (МКРЗ 65), создавал неверное представление, что воздействие ниже этого уровня является безопасным. Действительно, результаты анализа объединенных эпидемиологических исследований в жилищах, проведенного в рамках радонового проекта ВОЗ [51], убедительно продемонстрировали следующее:

- риск рака легкого увеличивается линейно с долгосрочной радоновой экспозицией (30 лет);
- нет свидетельств наличия порога;
- риск возрастает статистически значимо даже при умеренных содержаниях радона в жилых помещениях на уровне 50–100 Бк/м<sup>3</sup>;
- большинство обусловленных радоном раков легкого вызвано скорее низкими и средними концентрациями радона, чем высокими, потому что, в общем, меньшее количество людей подвергается воздействию высоких концентраций радона.

В противовес концепции уровней действия референтный уровень представляет собой уровень дозы, риска или концентрации радионуклидов, допущение превышения которого при планировании считается неприемлемым, а ниже которого должна осуществляться оптимизация защиты. Следствием применения подхода к регулированию на основе референтного уровня является то, что оптимизация должна применяться как оправданная мера выше и ниже референтного уровня, а не только когда он превышает. Суть процесса оптимизации защиты состоит в проведении мероприятий, направленных на удержание и последовательное снижение облучения в помещении (независимо от предназначения здания и типа его обитателей) до такого низкого уровня, который разумно достигим с учетом социально-

экономических факторов. В результате оптимизации перманентное и разумно обоснованное снижение значений референтных уровней позволит последовательно реализовывать долгосрочную стратегию обеспечения радонобезопасности населения, целью которой является снижение заболеваемости легочной патологией. Применение принципа оптимизации в управлении радоновым риском является ключевым элементом современной методологии регулирования радоновой проблемы, изложенной в новой Публикации 126 МКРЗ «Радиологическая защита от радона» [60,65]. Основная идея современной стратегии регулирования защиты населения от радиоактивного газа радона заключается не только в снижении индивидуальных рисков от радона для наиболее облучаемых лиц, но и в последовательном снижении риска для всего населения.

В соответствии с новыми эпидемиологическими данными МКРЗ рекомендует установить верхнюю границу производного референтного уровня по объемной активности радона в жилищах на уровне  $300 \text{ Бк/м}^3$  вместо верхней границы уровня действия  $600 \text{ Бк/м}^3$ , рекомендованного в Публикации 65. В дозовом эквиваленте среднегодовое значение ОА радона на уровне  $300 \text{ Бк/м}^3$  соответствует облучению населения  $10 \text{ мЗв/год}$ , учитывая дозовый коэффициент, рассчитанный на основе условного дозового перехода и пересмотренного значения номинального коэффициента риска. Вместе с тем Комиссия настоятельно рекомендует национальным регуляторам установить производный референтный уровень в диапазоне от  $100 \text{ Бк/м}^3$  до  $300 \text{ Бк/м}^3$  с учетом социально-экономических условий в каждой стране. Целесообразность установления значений референтных уровней на как можно более низком уровне обусловлена направленностью на достижение стратегической цели, заключающейся в снижении заболеваемости и смертности населения от онкологических заболеваний легкого.

Для контроля облучения населения Комиссия рекомендует применять универсальный подход, направленный на управление зданием или местом, где имеет место быть ситуация облучения индивидуума радоном, независимо от предназначения здания и типа его обитателей. Для жилых, общественных помещений и рабочих мест рекомендуется

установить единый референтный уровень в единицах объемной активности радона не более 300 Бк/м<sup>3</sup>.

При рассмотрении вопросов регулирования облучения на рабочих местах Комиссия отмечает, что на большинстве рабочих мест облучение радоном является побочным и не рассматривается как профессиональное. Однако конечное решение остается за национальными властями, которые могут отнести облучение работников радоном на некоторых рабочих местах (например, термальные курорты, пещеры и другие подземные рабочие места) к категории профессионального облучения. Заметим, что эта рекомендация МКРЗ в нашей стране в нормативной форме реализована при подготовке НРБ-99 и ОСПОРБ-99 более 15 лет назад, о чем подробнее сказано в разделе 7.2.

Для контроля за облучением на рабочих местах МКРЗ предлагает использовать ступенчатый подход, успешность реализации которого определяется степенью влияния на ситуацию облучения в плане определения форм ответственности работодателя перед работником. На начальном этапе рекомендуется установить референтный уровень такой же, как в жилых помещениях, – 300 Бк/м<sup>3</sup>, если облучение работников не является следствием их профессиональной деятельности, напрямую связанной с источником облучения. Если проведение радонозащитных мероприятий не позволяет снизить содержание радона на рабочем месте до установленного уровня, то его значение корректируется в сторону увеличения с учетом временных параметров облучения работника и соблюдения верхнего предела по эффективной дозе – 10 мЗв/год. В этом случае устанавливается производный референтный уровень по объемной активности радона 1000 Бк/м<sup>3</sup> в качестве отправной точки для применения требований защиты от профессионального облучения. Воздействие радона на рабочем месте следует рассматривать как составляющую профессионального облучения в том случае, если, несмотря на все усилия, облучение остается выше референтного уровня (более 10 мЗв/год, 1000 Бк/м<sup>3</sup>). Применение принципов регулирования защиты от радона в ситуации планируемого облучения (установление предела дозы, индивидуальный контроль и т. д.) должно применяться, если национальные власти

сочтут, что ситуация облучения радоном должна трактоваться как ситуация планируемого облучения (например, работа по добыче урана в урановых рудниках).

Одной из существенных особенностей современных рекомендаций МКРЗ является изменение подхода к оценке эффективной дозы облучения при ингаляционном поступлении радона и дочерних продуктов его распада. Комиссия решила отойти от ранее применяемого подхода на основе условного дозового перехода и использовать классические дозиметрические модели для расчета доз внутреннего облучения при ингаляционном поступлении радионуклидов. Целесообразность этого решения вызывает сомнения и вполне оправданные опасения, обусловленные возможным усложнением регулирования радона на рабочих местах. Учитывая сложность дозиметрических моделей и значительную вариабельность параметров, зависящих от качества внутренней среды помещений, следует ожидать высокую степень неопределенности в оценках доз облучения.

Проблеме адресной защиты критической группы населения – табакокурильщиков, наиболее уязвимой в отношении воздействия радиоактивного газа радона на развитие заболеваний легкого, также уделено внимание в новой Публикации [60].

В документе отмечается, что, несмотря на то, что абсолютный риск возникновения рака легкого, обусловленного радоном, у курильщиков значительно превышает аналогичный показатель у некурящих людей, Комиссия рекомендует не делать различий в подходах к защите этой группы населения, основываясь на факте добровольного выбора человеком пристрастия к курению табака. Вместе с тем, учитывая, что радон и табакокурение являются основными факторами риска при развитии легочной онкопатологии, Комиссия отмечает необходимость применения скоординированной политики при реализации национальных стратегий по защите населения от радона и снижению потребления табачных изделий.

Особое внимание в Публикации 126 уделяется вопросам стратегии радиационной защиты от радона. При ее разработке рекомендуется использовать принцип обоснования, применение которого предполагает, что любое решение, которое приводит к изменению ситуации

радиационного облучения, должно приносить больше пользы, чем вреда (103, ICRP, 2007; п. 203) [59]. Ответственность за оценку обоснованности стратегии защиты от радона ложится на правительство или национальные органы власти. Поскольку облучение радоном является главным образом проблемой общественного здравоохранения, то национальная стратегия защиты должна быть нацелена на снижение заболеваемости и смертности населения от онкологических заболеваний легкого.

Для реализации национальной стратегии Комиссия рекомендует странам принять национальный план действий, целью которого является снижение не только индивидуальных рисков от радона для наиболее облучаемых лиц, но и общего коллективного риска для всего населения. При этом должны применяться как предупредительные меры, так и корректирующие действия. Стратегия предупредительных мер направлена на снижение коллективного риска путем предотвращения или минимизации риска потенциального облучения от радона. Стратегия корректирующих действий направлена на снижение индивидуального риска путем уменьшения риска облучения населения в существующих жилищах.

В основе национального плана действий должно быть утверждение национального референтного уровня, а затем применение поступательного повторяющегося процесса оптимизации путем реализации широкого спектра мероприятий с учетом целого ряда факторов, таких как экологические, медицинские, экономические, архитектурные, образовательные и т. п. План действий должен рассматривать облучение населения радоном в жилищах, общественных зданиях и на рабочих местах.

МКРЗ в Публикации 126 рекомендует предусмотреть в национальном плане действий выполнение целого ряда мероприятий, представленных на рис. 7.1.



*Рис. 7.1. Комплекс мероприятий национального плана действий*

Они должны включать разработку и совершенствование нормативно-правовой базы, проведение радоновых обследований и радонозащитных, в том числе профилактических (превентивных) мероприятий. Должно быть налажено взаимодействие между местными, региональными и федеральными органами власти, проведено согласование национального плана действий с другими национальными программами, а также установлено распределение ответственности за ситуацию облучения. Предметное внимание должно уделяться развитию научно-образовательного кластера, в том числе подготовке кадров. Наряду с этими мероприятиями особое место в национальном плане должно быть отведено информированию населения и развитию эффективных коммуникационных стратегий, направленных на совершенствование взаимодействия между местными органами власти, строительными организациями, общественными учреждениями, различными заинтересованными сторонами с целью их вовлечения в процесс защиты населения от радона.

На основании представленной выше информации можно сделать следующее заключение. Международная комиссия по радиологической защите на основе всестороннего анализа эпидемиологических данных предложила современную оценку количественных характеристик риска развития легочной онкопатологии при облучении населения радоном в жилищах. На этой основе были выработаны рекомендации по радиационной защите населения от радона. Указанные оценки и рекомендации представлены в изданных МКРЗ Публикациях 115 и 126 [57, 60], которые могут быть использованы в национальных стратегиях защиты населения от радона.

### **Деятельность МАГАТЭ в области регулирования защиты населения от радона**

Международное агентство по атомной энергии в соответствии со статьей III.A.6 Устава устанавливает стандарты радиационной безопасности для охраны здоровья и минимизации опасности для жизни и имущества, а также оказывает поддержку государствам-членам МАГАТЭ в применении этих стандартов. Стандарты безопасности МАГАТЭ являются глобальными рекомендациями, которые по своей иерархии состоят из трех уровней.

Высший уровень занимают Фундаментальные основы безопасности (Safety Fundamentals, SF-1), которые определяют основополагающие (нравственные, этические) цели и принципы радиационной защиты и безопасности. Второй уровень занимают Требования безопасности (Safety Requirements), которые регулируются целями и принципами Фундаментальных основ безопасности. Эти требования представлены в наборе публикаций (стандартов безопасности), положения которых должны в обязательном порядке выполняться с целью обеспечения защиты людей и окружающей среды как сейчас, так и в будущем. Если они не выполняются, то должны быть приняты меры для достижения или восстановления требуемого уровня безопасности. Требования безопасности (Safety Requirements) используются государствами-членами МАГАТЭ для создания в установленном порядке национальной нормативной базы. Третий уровень отводится Руководствам по безопасности, которые содержат рекомендации и

указания, касающиеся путей выполнения Требований безопасности. Они включают рекомендуемые на основе международного консенсуса меры, которые необходимо принять, чтобы достичь высоких уровней безопасности.

Основываясь на принятой трехуровневой иерархии глобальных рекомендаций, МАГАТЭ в свете новых данных об облучении населения радоном в жилищах сосредоточило основное внимание на подготовке современных документов второго и третьего уровня, руководствуясь, конечно, при этом документом первого уровня – Фундаментальными основами безопасности, в частности, содержащимся в них принципом безопасности 10. Указанный принцип гласит: «Защитные меры по сокращению существующих или нерегулируемых радиационных рисков должны быть обоснованы и оптимизированы». Один тип ситуации, предусмотренной в этом принципе, касается воздействия природных источников, включая воздействие радона в жилых помещениях и на рабочих местах, и внешнего гамма-облучения от радионуклидов природного происхождения в строительных материалах.

Основываясь на современных научных оценках эффектов облучения радоном, предоставленных Научным комитетом Организации Объединенных Наций по действию атомной радиации [1, 2], а также рекомендациях Международной комиссии по радиологической защите [57, 60], в 2014 году МАГАТЭ был издан документ второго уровня – Международные основные стандарты безопасности (ОСБ) [61]. В нем содержится (часть 3 ОСБ) Требование 50 «Облучение населения радоном в помещении». В соответствии с указанным требованием правительства государств-членов МАГАТЭ должны предоставить информацию о радоне в помещении и связанными с ним рисками для здоровья, оценить выявленную ситуацию существующего облучения и установить соответствующие референтные уровни (п. 52, Основные стандарты безопасности), а также при необходимости, подготовить и внедрить план действий по контролю за облучением населения радоном в помещениях.

В развитие Требования 50 Основных стандартов безопасности МАГАТЭ в сотрудничестве с ВОЗ выпустило в 2014 году документ

третьего уровня – Руководство по безопасности (SSG 32) «Защита населения от облучения радоном и другими природными источниками излучения в помещении» [62]. Указанное Руководство включает рекомендации по применению требований ОСБ относительно облучения природными источниками излучения внутри помещений в ситуациях существующего облучения. Руководство определяет методологию применения принципов обоснования и оптимизации защиты национальными органами при рассмотрении вопросов контроля природных источников излучения, таких как радон в помещении и естественные радионуклиды в строительных материалах.

В Руководстве описана административная, правовая и нормативная базы, связанные с разработкой политики и роли национального органа, приведен обзор рисков, возникающих от радона и торона, и подходов к их управлению. Используемый в Руководстве термин «национальный орган» является собирательным, поскольку защита населения от облучения природными источниками излучения в жилищах в ситуациях существующего облучения является как проблемой радиационной защиты, так и проблемой общественного здравоохранения. Термин «национальный орган» относится ко всем организациям, участие которых необходимо для реагирования на ситуации, когда воздействие естественных источников радиации должно быть уменьшено. В национальный орган могут быть включены организации, ответственные за радиационную защиту и политику в области общественного здравоохранения, государственные и частные предприятия, специализирующиеся на радиационных измерениях, а также органы, которые устанавливают и внедряют строительные стандарты. Как правило, ведущей должна быть организация, ответственная за радиационную защиту.

Национальный орган должен провести оценку вероятности воздействия природных источников ионизирующего излучения в жилых домах. Основу такой оценки составляет определение степени облучения населения радоном посредством национальных и региональных обследований с использованием утвержденных методов измерения. Такие исследования могут быть также использованы для выявления областей с более высокими, чем в среднем концентрациями радио-

активного газа радона, часто обозначаемыми как радоноопасные области. По результатам проведенной оценки устанавливается необходимость в дальнейших действиях и, основываясь на масштабах проблемы, решается вопрос о разработке всеобъемлющей политики для обеспечения оптимальной защиты населения от облучения природными источниками излучения внутри помещений. Если полученные результаты показывают, что облучение населения радоном вызывает озабоченность с точки зрения общественного здравоохранения, правительство должно «обеспечить утверждение плана действий, включающего согласованные мероприятия по уменьшению таких уровней как в существующих, так и проектируемых зданиях» (п. 5.20. ОСБ). Такой план обычно реализуется национальным органом и включает в себя следующие компоненты:

- ✓ принятие соответствующего референтного уровня по объемной активности радона для жилых и общественных зданий;
- ✓ принятие соответствующего референтного уровня для рабочих мест, таких как офисы и заводы;
- ✓ определение радоноопасных областей (территорий);
- ✓ оценка эффективности мер по снижению концентрации радона-222 в питьевой воде и контролю содержания радия-226 в строительных материалах;
- ✓ принятие соответствующих мер профилактической и корректирующей направленности для снижения облучения населения, которые должны быть внесены в строительные законы;
- ✓ определение обстоятельств, при которых осуществление мер по ограничению и сокращению воздействия радона должно носить обязательный или добровольный характер;
- ✓ оценка эффективности выполнения этого плана.

При выборе референтного уровня Руководство рекомендует с учетом сложившихся социальных и экономических обстоятельств значение, не превышающее в целом среднегодовую объемную активность –  $300 \text{ Бк/м}^3$  (п. 5.20 (а) ОСБ). Объемная активность  $300 \text{ Бк/м}^3$  соответствует годовой эффективной дозе порядка  $10 \text{ мЗв}$  при усло-

вии, что коэффициент равновесия для радона в жилых помещениях составляет 0,4, а время экспозиции 7000 ч в год. Выбранный референтный уровень должен быть применен к жилищам и другим зданиям с высоким коэффициентом занятости для населения.

Учитывая важность первого этапа в разработке национальной радоновой стратегии, связанного с получением информации о масштабах проблемы, МАГАТЭ выпустило документ «Национальные и региональные обследования концентраций радона в жилищах: обзор методологии и измерительной техники [63]. В данном документе рассмотрена методология планирования и осуществления общенационального обследования, которое имеет целью получение репрезентативной оценки распределения среднегодовых концентраций радона при облучении населения в жилых помещениях. При этом приводится в доступной для широкой аудитории форме довольно полный обзор основных методов и измерительной техники, а также обширная библиография. Описаны и обсуждены основные элементы плана обследования, такие как схема отбора проб, протоколы и анкеты, а также анализ данных с учетом возможных потенциальных ошибок (смещений), которые могут повлиять на результаты измерений и оценок.

Следует отметить, что представленные в документе [63] методы могут быть применены как для широкомасштабных исследований, так и для исследований, проводимых в одном или нескольких регионах в пределах одной страны. Региональные исследования используются для проведения общенационального пошагового обследования. Каждый шаг представляет отдельное региональное обследование, в результате чего проведение большого общенационального опроса становится более реальным. Кроме того, региональное обследование подходит для федеративных государств. В документе представлена информация о географическом или отображенном на карте обследовании, которое направлено на оценку в деталях географического распределения концентрации радона в жилых помещениях. Это обследование, как правило, представляет собой следующий этап программы и требует достаточно высокого количества отобранных для обследования домов. Географическое обследование предназначено для оптимизации процесса поиска тех жилищ с высокой концентрацией радона,

общее число которых было оценено с помощью репрезентативного национального обследования. Спланированные надлежащим образом географические обследования могут также давать адекватную информацию о репрезентативном распределении радона внутри помещений по всей стране, а также могут дать определенную полезную информацию о географическом распределении концентрации радона. В документ включен и обзор методов, пригодных для долгосрочных измерений концентрации радона, используемых в национальных и региональных радоновых обследованиях, при этом особое внимание уделено элементам, которые могут повлиять на точность результатов измерений.

Наряду с разработкой документов по актуальным вопросам радоновой проблемы МАГАТЭ осуществляет проекты, связанные с изучением состоянием радоновой проблемы в мире. В частности, под эгидой МАГАТЭ осуществляется проект технического сотрудничества регионов Европы RER / 9/127 «Создание усовершенствованных подходов к контролю облучения населения радоном», в котором принимают участие 27 государств (в основном, страны Восточной Европы и бывшего СССР). В качестве инструмента исследования в проекте был использован разработанный МАГАТЭ вопросник, охватывающий все важные проблемы, связанные с состоянием радоновой стратегии в настоящее время и перспективами ее развития в будущем. Вопросник состоял из 6 тематических разделов: радоновые политики и стратегии; радон в гражданском строительстве; измерение радона; осознание проблемы радона общественностью; радоновое обследование; образование. По результатам ответов был подготовлен проект технического документа, в котором подводятся итоги внедрения требований МАГАТЭ в области радоновой политики, оценены доступность имеющейся измерительной техники и результаты национальных и местных обследований, проведенных в государствах-членах МАГАТЭ. Документ не содержит критическую оценку политики, стратегий и других мероприятий по радону, проводимых в государствах-членах. Он позволяет МАГАТЭ оценить уровень развития проблемы защиты населения от воздействия радона в соответствии с требованиями и рекомендациям Агентства,

а также определить приоритетные направления по совершенствованию своей деятельности в данной сфере.

Таким образом, МАГАТЭ при решении проблем радиационной защиты населения от воздействия радона в жилищах не только разрабатывает требования (стандарты безопасности) и рекомендации, но и осуществляет всестороннюю поддержку государствам-членам по их реализации на национальном уровне.

### **Рекомендации Еврокомиссии по совершенствованию защиты населения стран-участниц Европейского Союза от радона в жилищах**

В качестве примера использования рекомендаций международных организаций в области радиационной защиты населения от воздействия радона в жилищах представляется целесообразным рассмотреть действия Европейского сообщества (ЕС) в данной сфере. Правовую основу защиты здоровья работников и населения государств-членов ЕС определяет договор Евроатома, заключенный в 1957 г. В соответствии с этим договором в ЕС должны быть разработаны единые базовые стандарты по охране здоровья работников и населения от опасностей, возникающих вследствие воздействия ионизирующих излучений. Разработка стандартов осуществляется специальной Комиссией, которая приступает к работе после получения мнения группы научных экспертов (в том числе в области общественного здравоохранения), назначаемых научным и техническим комитетами ЕС.

Последний пересмотр единых базовых стандартов в ЕС был проведен в 2013 г. Директивой Совета 2013/59/ Евроатома [64]. В основу мотивации и цели пересмотра была положена необходимость модернизации Европейского законодательства в области радиационной защиты с учетом последних научных выводов НКДАР ООН и рекомендаций МКРЗ, охвата всех источников излучения (в том числе природного) и всех ситуаций облучения, а также гармонизации, по мере возможности, численных значений с международными стандартами. В части природных источников излучения предусматривается совершенствование защиты населения от радона в жилищах, от облучения радионуклидами естественного происхождения, содержащи-

мися в строительных материалах, а также предусматривается защита работников от радона на рабочих местах и при осуществлении деятельности, связанной с переработкой естественных радиоактивных материалов.

Директива Совета 2013/59/ Евроатома (статья 103) предлагает создание [64, 66] национального плана действий при решении долгосрочных рисков от воздействия радона в жилищах, общественных учреждениях и на рабочих местах. Также рассматриваются и другие пути облучения населения радоном – почва, строительные материалы, питьевая вода. Организация защиты предусматривает принятие национального плана действий, обеспечивающего надлежащие меры по предотвращению проникновения радона в новые здания (например, вводя требования к строительным материалам) и по выявлению областей со значительным количеством зданий, где ожидается превышение национального референтного уровня. Директива содержит положения, которые должны войти в национальный план действий. С целью организации радиационной защиты населения в жилищах от облучения радоном Директива Совета 2013/59/ Евроатома обязывает установить национальный референтный уровень для концентрации радона в помещении на уровне, не превышающем  $300 \text{ Бк/м}^3$ . При этом необходимо организовать выявление жилищ с концентрацией радона, превышающей референтный уровень, а также предоставить населению информацию на местном и национальном уровне:

- о рисках для здоровья, связанных с облучением радоном;
- о важности выполнения измерений;
- о технических средствах, применение которых позволяет снизить концентрацию радона.

С целью организации радиационной защиты на рабочих местах от облучения радоном Директива Совета 2013/59/ Евроатома обязывает установить национальный референтный уровень для концентрации радона на рабочих местах в помещениях не более  $300 \text{ Бк/м}^3$  и организовать мероприятия по измерению содержания радона в помещениях. При выявлении случаев превышения установленных уровней на рабочих местах необходимо уведомить компетентные органы и организовать мероприятия по снижению облучения. Директива предусматри-

вает рассмотрение ситуации производственного облучения радоном в дозах более 6 мЗв/год (в случае отсутствия возможности изменить ситуацию путем применения радонозащитных мероприятий) как ситуацию планируемого облучения с введением соответствующих мер защиты в условиях профессионального облучения. Директива Совета 2013/59/ Евратома была опубликована в официальном журнале Европейского Союза 17 января 2014 г. и вступила в силу. Для реализации указанной директивы, 28 государств-членов Европейского Союза в течение четырех лет должны будут к 6 февраля 2018 г. ввести в действие соответствующие национальные законы, регулирующие и административные документы. В течение 2014–2016 гг. на уровне ЕС будет проводиться оценка стратегий и планов государств-членов, обсуждение проблем, обмен опытом и резолюциями, выявление хорошей практики. По результатам этой работы будут издаваться соответствующие указания. В течение 2016 – 2018 годов будет проводиться анализ национальных проектов документов государств-членов и оценка их соответствия основным требованиям в области защиты от радона.

### *Литература*

1. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Volume I: Sources; Vol. II: Effects // United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes. – United Nations: New York. – 2000.
2. Sources-to-Effects Assessment for Radon in Homes and Workplaces // United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 2006 Report to the General Assembly, with scientific annexes. – United Nations: New York. – 2009.
3. Sources and effects of ionizing radiation // United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 1993 Report to the General Assembly with scientific annexes. – United Nations: New York. – 1993.
4. *Stidley C.A., Samet J.M.* A review of ecologic studies of lung cancer and indoor radon / *C.A. Stidley, J.M. Samet* // *Health Phys.* – 1993. Vol. 65(3). – P. 234–251.

5. *Stidley C.A.* Assessment of ecologic regression in the study of lung cancer and indoor radon / *C.A. Stidley, J.M. Samet* // *Am. J. Epidemiol.* – 1994. 139(3). – P. 312–322.
6. *Lubin J.H.* Errors in exposure assessment, statistical power and the interpretation of residential radon studies / *J.H. Lubin, J.D. Boice, Jr., J.M. Samet* // *Radiat. Res.* – 1995. 144(3). – P. 329–341,
7. *Lubin J.H.* On the discrepancy between epidemiologic studies in individuals of lung cancer and residential radon and Cohen's ecologic regression / *J.H. Lubin* // *Health Phys.* – 1998. 75(1). – 4–10.
8. *Cohen B.L.* Response to criticisms of Smith et al / *B.L. Cohen* // *Ibid.* – 1998. 75(1). – P. 23–28.
9. The Health Effects of Exposure to Indoor Radon. National Academy of Sciences, National Research Council // Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations (BEIR VI). – Washington, DC: National Academy Press. – 1999.
10. *Cohen B.L.* Testing a BEIR-VI suggestion for explaining the lung cancer vs. radon relationship for U.S. counties / *B.L. Cohen* // *Health Phys.* – 2000. 78 (5). – P.522–527.
11. *Cohen B.L.* Review: Cancer risk from low-level radiation / *B.L. Cohen* // *Am. J. Roentgenol.* – 2002. 179(5). – P. 1137–1143.
12. *Puskin J.S.* Response to Cohen (letter) / *J.S. Puskin, A.C. James, N.S. Nelson* // *Health Phys.* – 2004. 86(2). – P. 204–205.
13. *Жуковский М.В.* Радон: история и современность / *М.В. Жуковский* // *Вестник УрО РАН.* – 2009. № 4 (30) – 2010, № 1 (31).
14. *Baysson H.* Indoor radon exposure and lung cancer risk: a review of case-control studies/ *H. Baysson, M. Tirmarche* // *Rev. Epidemiol. Santé Publique.* – 2004. 52(2). – P. 161–171.
15. *Schoenberg J.B.* Case-control study of residential radon and lung cancer among New Jersey women / *J.B. Schoenberg, J.B. Klotz, H.B. Wilcox* [et al.] // *Cancer Res.* – 1990. 50(20). – P. 6520–6524 ,
16. *Blot W.J.* Indoor radon and lung cancer in China / *W.J. Blot, Z.Y. Xu, J.D. Boice Jr.* [et al.] // *J. Natl. Cancer Inst.* – 1990. 82(12). – P. 1025–1030.
17. *Pershagen G.* Residential radon exposure and lung cancer in Swedish women / *G. Pershagen, Z. H. Liang, Z. Hrubec* [et al.] // *Health Phys.* – 1992. 63(2). – P. 179–186, 1992.

18. *Pershagen G.* Residential radon exposure and lung cancer in Sweden / *G. Pershagen, G. Akerblom, O. Axelson* [et al.] // *N. Engl. J. Med.* – 1994. 330(3). – P. 159–164, 1994.
19. *Letourneau E.G.* Case-control study of residential radon and lung cancer in Winnipeg, Manitoba, Canada / *E.G. Letourneau, D. Krewski, N.W. Choi* [et al.] // *Am. J. Epidemiol.* – 1994. 140(4). – P. 310–322.
20. *Alavanja M.C.* et al. Residential radon exposure and lung cancer among nonsmoking women / *M.C. Alavanja, R.C. Brownson, J.H. Lubin* // *J. Natl. Cancer Inst.* – 1994. 86(24). – P. 1829–1837.
21. *Auvinen A.* Indoor radon exposure and risk of lung cancer: A nested case-control study in Finland / *A. Auvinen, I. Makelainen, M. Hakama* [et al.] // *J. Natl. Cancer Inst.* – 1996. 88(14). – P. 966–972.
22. *Ruosteenoja E.* Radon and lung cancer in Finland / *E. Ruosteenoja, I. Mäkeläinen, T. Rytömaa* [et al.] // *Health Phys.* – 1996. 71(2). – P. 185–189.
23. *Lagarde F.* Residential radon and lung cancer in Sweden: risk analysis accounting for random error in the exposure assessment / *F. Lagarde, G. Pershagen, G. Åkerblom* [et al.] // *Health Phys.* – 1997. 72(2). – P. 269–276.
24. *Darby S.* Risk of lung cancer associated with residential radon exposure in south-west England: a case-control study / *S. Darby, E. Whitley, P. Silcocks* [et al.] // *Br. J. Cancer.* – 1998. 78(3). – P. 394–408.
25. *Alavanja M.C.* Residential radon exposure and risk of lung cancer in Missouri / *M.C. Alavanja, J.H. Lubin, J.A. Mahaffey* [et al.] // *Am. J. Public Health.* – 1999. 89(7). – P. 1042–1048.
26. *Field R.W.* Topics under debate – Does exposure to residential radon increase the risk of lung cancer? / *R.W. Field, K. Becker, J.C. McDonald* // *Radiat. Prot. Dosim.* – 2001. 95(1). – P. 75–81.
27. *Kreienbrock L.* Case-control study on lung cancer and residential radon in western Germany/ *L. Kreienbrock, M. Kreuzer, M. Gerken* [et al.] // *Am. J. Epidemiol.* – 2001. 153(1). – P. 42–52.
28. *Pisa F.E.* Residential radon and risk of lung cancer in an Italian alpine area / *F.E. Pisa, F. Barbone, A. Betta* [et al.] // *Arch. Environ. Health.* – 2001. 56(3). – P. 208–215.
29. *Lagarde F.* Residential radon and lung cancer among never-smokers in Sweden / *F. Lagarde, G. Axelsson, L. Damber* [et al.] // *Epidemiology.* – 2001. 12(4). – P. 396–404.

30. *Tomasek L.* Radon exposure and lung cancer risk — Czech cohort study on residential radon / *L. Tomasek, E. Kunz, T. Muller* [et al.] // *Sci. Total Environ.* – 2001. 272(1–3). – P. 43–51.
31. *Tomasek L.* Study of lung cancer and residential radon in the Czech Republic / *L. Tomasek, E. Kunz, T. Muller* [et al.] // *Cent. Eur. J. Public Health* – 2001. 9(3). – P. 150–153.
32. *Wang Z.* Residential radon and lung cancer risk in a high-exposure area of Gansu Province, China / *Z. Wang, J.H. Lubin, L. Wang* [et al.] // *Am. J. Epidemiol.* – 2002. 155(6). – P. 554–564.
33. *Barros-Dios J.M.* Exposure to residential radon and lung cancer in Spain: a population-based case-control study/ *J.M. Barros-Dios, M.A. Barreiro, A. Ruano-Ravina* et al. // *Am. J. Epidemiol.* – 2002. 156(6). – P. 548–555.
34. *Lagarde F.* Glass-based radon-exposure assessment and lung cancer risk / *F. Lagarde, R. Falk, K. Almren* [et al.] // *J. Expo. Anal. Environ. Epidemiol.* – 2002. 12(5). – P. 344–354.
35. *Oberaigner W.* Radon und Lungenkrebs im Bezirk Imst. Österreich (H. E. Wichmann, H. W. Schlipköter and G. Fülgraff, eds.) / *W. Oberaigner; L. Kreienbrock, A. Schaffrath Rosario* [et al.] // *Fortschritte in der Umweltmedizin.* Ecomed Verlag, Landsberg am Lech. – 2002.
36. *Schaffrath Rosario A.* Residential radon and lung cancer risk: first analyses of a case-control study in the district of Imst, Tyrol / *A. Schaffrath Rosario, W. Oberaigner, J. Wellmann* [et al.] // *Austria.* p. 629–634 in: *Indoor Air 2002. Proceedings of the Ninth International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Monterey, California, 2002.* Vol. 1 (H. Levin, ed.). International Society of Indoor and Climate, Santa Cruz, CA. – 2002.
37. *Kreuzer M.* Residential radon and risk of lung cancer in eastern Germany / *M. Kreuzer, J. Heinrich, G. Wolke* [et al.] // *Epidemiology.* – 2003. 14(5). – P. 559–568.
38. *Schaffrath Rosario A.* Bewertung des Lungenkrebs-risikos durch Radon in Wohnungen in Deutschland mit Hilfe statistisch-epidemiologischer Modelle. Abschlussbericht an das Bundesamt für Strahlenschutz und den Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Forschungsvorhaben StSch 4237 / *A. Schaffrath Rosario, I.M. Heid, L. Kreienbrock* [et al.] // *Bundesamt für Strahlenschutz.* – Neuherberg. – 2004.

39. *Wichmann H.E.* Increased lung cancer risk due to residential radon in a pooled and extended analysis of studies in Germany / *H.E. Wichmann, A.S. Rosario, I.M. Heid* [et al.] // *Health Phys.* – 2005. 88(1). – P. 71–79.
40. *Baysson H.* Indoor radon and lung cancer in France / *H. Baysson, M. Tirmarche, G. Tymen* et al. // *Epidemiology.* – 2004. 15(6). – P. 709–716.
41. *Darby S.* Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies / *S. Darby, D. Hill, A. Auvinen* [et al.] // *Br. Med. J.* – 2005. 330(7485). – P. 223.
42. *Darby S.* Residential radon and lung cancer – detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14 208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe / *S. Darby, D. Hill, H. Deo* [et al.] // *Scand. J. Work Environ. Health.* – 2006. 32 (Suppl. 1). – P. 1–84.
43. *Krewski D.* Risk of lung cancer in North America associated with residential radon / *D. Krewski, J. Lubin, J.M. Zielinski* [et al.] // *Epidemiology.* – 2005. 16(2). – P. 137–145.
44. *Krewski D.A* combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer / *D. Krewski, J. Lubin, J.M. Zielinski* [et al.] // *J. Toxicol. Environ. Health Part A.* – 2006. 69(7–8). – P. 533–598.
45. *Lubin J.H.* Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies / *J.H. Lubin, Z.Y. Wang, J.D. Boice Jr.* [et al.] // *Int. J. Cancer.* – 2004. 109(1). – P. 132–137.
46. Effects of exposure to radon gas. // UNSCEAR briefing note, 21.07.2009. – New York: United Nations. – 2009.
47. Indoor air quality research: report on a WHO meeting, Stockholm, 27–31 August 1984 // World Health Organization. – Copenhagen. – 1986,
48. *Van Deventer E.* Radon, a public health priority. The concept of national radon programs in the WHO Radon Handbook, Department of Public Health, Environmental and Social Determinants of Health / *E. Van Deventer* // WHO, ASN–NRPA Worksho. – 2014 October 14, Paris. – 2014.

49. *Zielinski J.* World Health Organization's International Radon Project / *J. Zielinski, Z. Carr, D. Krewski* [et al.] // *J Toxicol Environ Health A.* – 2006. 69(7). – P. 759–769.
50. Survey on radon guidelines programmes and activities. Final report. International radon project // WHO. – Geneva: WHO Press. – 2007.
51. Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective // World Health Organisation (WHO). – Geneva: WHO Press. – 2009.
52. Radiation Protection in Uranium and Other Mines. ICRP Publication 24. Ann. ICRP 1 (1) // ICRP. – 1977.
53. Limits for Inhalation of Radon Daughters by Workers. ICRP Publication 32. Ann. ICRP 6 (1) // ICRP. – 1981.
54. Radiation Protection of Workers in Mines. ICRP Publication 47. Ann. ICRP 16 (1) // ICRP. – 1986.
55. Principles for Limiting Exposure of the Public to Natural Sources of Radiation. ICRP Publication 39. Ann. ICRP 14 (1) // ICRP. – 1984.
56. Защита от радона-222 в жилых зданиях и на рабочих местах. Публикация 65 МКРЗ // ICRP. – М.: Энергоатомиздат. – 1995.
57. Риск возникновения рака легкого при облучении радоном и продуктами его распада. Заявление по радону / под ред. *М.В. Жуковского, С.М. Киселева, А.Т. Губина* / пер. Публикации 115 МКРЗ // ICRP. – Москва: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России». – 2013.
58. Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of the Radiation Protection of the Public. ICRP Publication 101a. Ann. ICRP 36 (3), 2006; The Optimisation of Radiological Protection – Broadening the Process. ICRP Publication 101b. Ann. ICRP 36 (3) // ICRP. – 2006.
59. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер с англ. / Под общей ред. *М.Ф. Киселёва и Н.К. Шандалы* // ICRP. – М.: Изд. ООО ПКФ «Алана». – 2009.
60. Руководство по защите от облучения радоном / под ред. *М.В. Жуковского, И.В. Яρμοшенко, С.М. Киселева* / пер. Публикации 126 МКРЗ // ICRP. – Москва: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России». – 2015.
61. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. Interim edition. № GSR Part 3 // IAEA. – Vienna: IAEA. – 2014.

62. SSG-32. Specific Safety Guide. Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation // IAEA. – Vienna: IAEA. – 2015.
63. IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications Series No. 33. National and Regional Surveys of Radon Concentration in Dwellings Review of Methodology and Measurement Techniques // IAEA. – Vienna: IAEA. – 2013.
64. Council Directive 2013/59/Euratom OJ L13. // Euratom. – 17.01. 2014. – P. 1 –73.
65. *Киселев С.М.* Эволюция подходов МКРЗ к регулированию защиты населения от радона / *С.М. Киселев* // Медицинская Радиология и радиационная безопасность. – 2016. Т.61, N.2. – P. 70-74.
66. *Bochicchio F.* Protection from radon exposure at home and at work in the forthcoming European Basic Safety Standards / *F. Bochicchio* // International Conference on Protection against Radon at Home and at Work. – Praha (Czech Rep.). – September 2nd–6th, 2013.

### **7.1.2 Опыт регулирования радоновой проблемы в странах Европы, США и Канады**

#### **Рекомендации международных организаций по формированию национальных стратегий и национальных планов действий**

Как было указано выше, международные организации, осуществляющие свою деятельность в сфере защиты населения от воздействия ионизирующей радиации, предупредили мировое сообщество об опасности для здоровья населения воздействия радона в жилищах и выработали новые рекомендации по его снижению [1–5]. В их основу в отличие от предыдущих рекомендаций МКРЗ [6], положен вывод о том, что не существует известного порога объемной активности (ОА), ниже которого радоновое облучение не представляет никакой опасности. Большинство радон-индуцированных раков легкого обусловлено скорее низкими и средними уровнями ОА радона, чем высокими. Поэтому формирование национальных стратегий

должно предусматривать решение двух взаимосвязанных ключевых задач, направленных на уменьшение как доли лиц, подвергающихся неприемлемо высоким индивидуальным рискам, связанным с радоном, так и среднего значения индивидуального радонового риска для всего населения страны. Их решение позволит в конечном итоге достичь стратегической цели – снизить заболеваемость и смертность населения от радон-индуцированных раков легкого.

Учитывая неординарность проблемы, включающей в себя как аспекты радиационной защиты, так и общественного здравоохранения, международными организациями (ВОЗ, МКРЗ, МАГАТЭ) предложено решать ее на основе долгосрочной национальной стратегии [2, 4, 5]. Радоновая стратегия должна быть разработана с участием соответствующих органов власти и заинтересованных сторон, используя при этом принцип обоснования. Ответственность за оценку обоснованности стратегии должна лежать на правительстве или национальных органах власти. На основе принятой стратегии должен быть разработан четкий и детальный национальный план действий (НПД). НПД является программным документом, сформированным на базе единой согласованной политики защиты от радона и определяющим последовательные этапы реализации национальной стратегии в долгосрочной перспективе. В Руководстве МАГАТЭ «Защита населения от облучения радоном и другими природными источниками излучения в помещении» [5] предлагается последовательность действий по формированию НПД. На первом этапе национальным органам необходимо провести измерительную программу по определению степени облучения населения  $^{222}\text{Rn}$ , посредством национальных и региональных обследований, по результатам которой решить вопрос о необходимости принятия национального плана действий по радону. При этом термин «национальный орган» является собирательным. В него могут быть включены организации, ответственные за радиационную защиту, разработку и внедрение строительных стандартов, а также политику в области общественного здравоохранения и др. ВОЗ, МКРЗ и МАГАТЭ [2, 4, 5] рекомендуют включить в национальный план действий следующие позиции:

разработку и совершенствование нормативно-правовой базы;  
принятие соответствующего референтного уровня для района для жилых зданий и других сооружений с высокой заполняемостью членами общества, а также для рабочих мест, таких как офисы и заводы,

проведение радоновых обследований и определение радоноопасных областей (территорий);

проведение соответствующих защищающих от проникновения радона превентивных мер (Preventive Measures) при строительстве новых зданий и корректирующих действий (Corrective Actions) в уже построенных сооружениях, которые должны быть внесены в строительные кодексы;

осуществление эффективных мер по снижению концентрации радона в питьевой воде и контролю содержания радия-226 в строительных материалах;

определение обстоятельств, при которых осуществление мер по ограничению и сокращению воздействия радона должно носить обязательный или добровольный характер;

организацию взаимодействия между местными, региональными и федеральными органами власти, согласование национального плана действий с другими национальными программами, а также четкое распределение ответственности за ситуацию облучения;

предметное развитие научно-образовательного кластера, в том числе подготовку кадров;

организация информирования населения и развитие эффективных коммуникационных технологий, направленных на совершенствование взаимодействия между местными органами власти, строительными организациями, общественными учреждениями, различными заинтересованными сторонами с целью их вовлечения в процесс защиты от радона.

Наряду с этими мероприятиями особое место в национальном плане действий должно быть отведено оценке эффективности его вы-

полнения и проведению его периодической корректировки в зависимости от достигнутых результатов.

Предложенные рекомендации по формированию национальных планов действий учитывают накопленный многими странами опыт в сфере снижения радоновой опасности. Во многих странах радонозащитные мероприятия начали проводиться задолго до публикации международных рекомендаций. В одних странах эти работы выполнялись в рамках национальных радоновых программ, в других – в рамках отдельных мероприятий. Издание международных рекомендаций является для всех государств важным ориентиром при организации комплексного подхода к решению данной проблемы на основе национального плана действий. В этой связи показательным является решение Европейского союза об обязательном создании к 6 февраля 2018 г. в 28 государствах-членах ЕС национальных планов действий [7]. Как установлено в 2014 г. Директивой ЕС, они должны быть основаны на соответственно адаптированных к этому сроку национальных законах, регулирующих и административных документах, направленных на решение проблем, связанных с уменьшением долгосрочных рисков от воздействия радона в жилищах.

Для Российской Федерации проблема снижения радоновой опасности для населения до настоящего времени остается весьма актуальной. Основываясь на современных рекомендациях ВОЗ, МКРЗ, МАГАТЭ [2, 4, 5], необходимо выбрать оптимальное решение данной проблемы в нашей стране. Очевидно, что оптимальность принимаемого решения, основанного на рекомендациях международных организаций, требует учета опыта зарубежных стран, накопленного в этой сфере.

Рассмотрению опыта отдельных государств Европы и Северной Америки, реализованного в рамках национальных программ по снижению радоновой опасности, посвящен настоящий раздел работы.

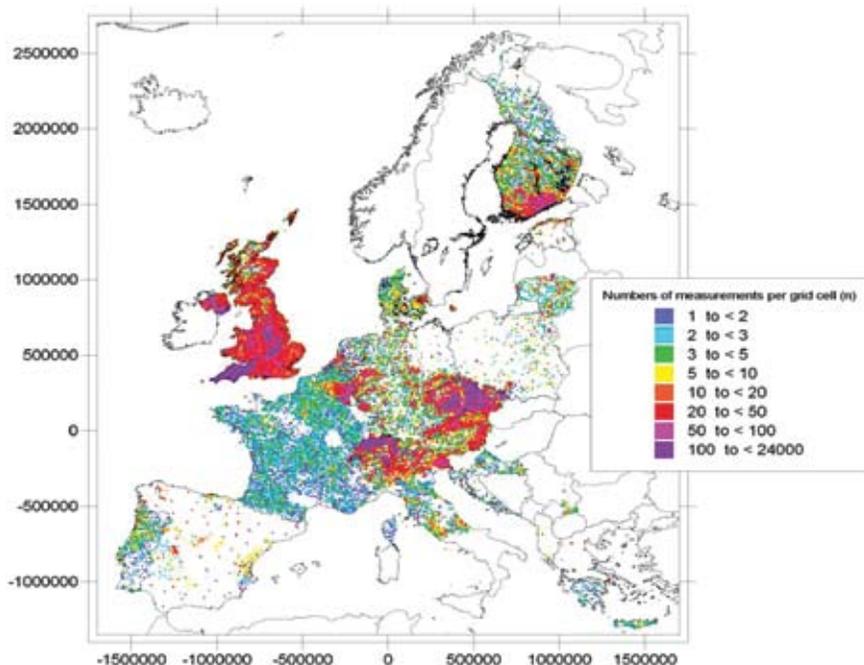
**Опыт реализации национальных программ  
по снижению радоновой опасности (планы действий)  
отдельных государств Западной Европы и Северной Америки**

**Страны Западной Европы**

Прежде чем приступить к обзору национальных планов действий отдельных стран Западной Европы, представляется целесообразным охарактеризовать в целом уровень радоновой опасности в данном регионе. В определенной степени — это можно сделать, проанализировав результаты деятельности стран Европейского Союза (ЕС) по картированию территорий, обобщенные в ряде научных публикаций [8, 9]. В 2006 г. Объединенным исследовательским центром европейской комиссии был запущен проект по созданию карты уровней радона как одной из частей создаваемого европейского атласа естественной радиации. Проект был начат с создания карты концентраций радона в жилищах. По состоянию на 2014 г., эта карта включает данные 24 стран, охватывая значительную часть Европы. Предполагается в последующем дополнить эти данные информацией о космическом излучении и мощности дозы гамма-излучения на местности [9]. При создании европейской карты были изучены данные по картированию, собранные отдельными странами. Оказалось, как отмечается Объединенным исследовательским центром ЕС [10], что их интеграция в единую карту ЕС невозможна из-за различий в дизайне, методах измерения и типах визуализации. На VIII Международном рабочем совещании по геологическим аспектам картирования радоновых рисков, состоявшемся в Праге в 2006 г., страны согласились участвовать в создании европейской карты радона в жилищах (European Indoor Radon Map – EIRM). Были достигнуты договоренности, что в континентальном масштабе карта будет состоять из ячеек с сеткой размером 10x10 км, в которых будет приведена средняя годовая концентрация радона в помещениях на первом этаже зданий. При этом будут учитываться характеристика зданий и демографическая репрезентативность. В целях соблюдения конфиденциальности персональных данных все оригинальные исходные данные будут агрегированы в таблицу. Для каждой ячей-

ки будут рассчитаны следующие статистические данные: среднее арифметическое (AM), стандартное отклонение (SD), при этом AM и SD трансформируются в логарифмический вид, а также указываются минимальное, медианное и максимальное значения и число измерений в ячейке.

В соответствии с договоренностями Объединенным исследовательским центром Европейской комиссии был подготовлен и разослан диагностический файл, полученные данные в последующем интегрированы [11–13]. По состоянию на 2014 г. составлена карта, которая имеет 21 000 заполненных ячеек на основе 800 000 отдельных измерений, представленных 24 европейскими странами, и, в общей сложности, охватывает значительную часть Европы [8]. При этом, как видно из рис. 7.2, число измерений в ячейке и охват территории существенно различаются между участвующими странами и между регио-



*Рис. 7.2. Количество измерений в ячейках с сеткой 10x10 км (включая все доступные данные до 2014 г.) [8, 10]*

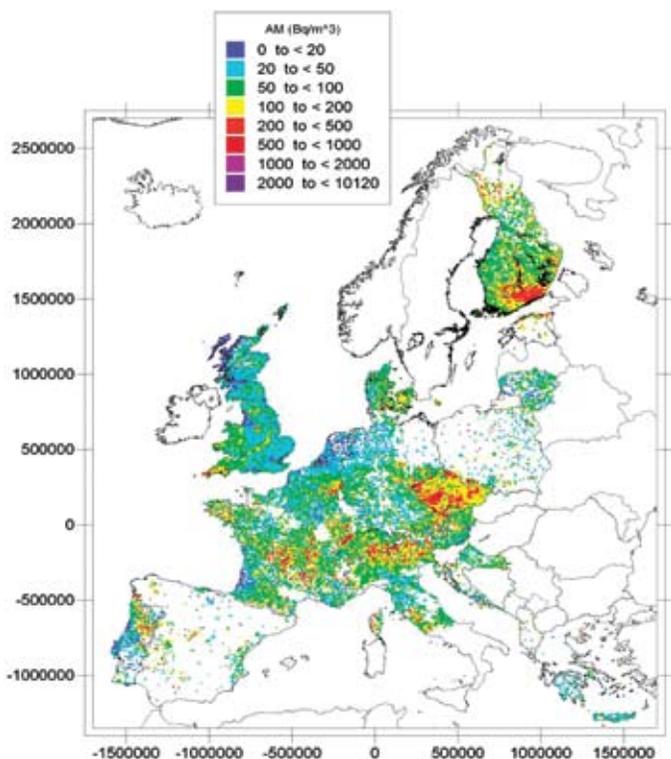
нами внутри этих стран. Ряд стран номинально обследовали свои территории на 100 %, некоторые только на 20 %. Представленные данные показывают [14], что некоторые страны сделали выбор при обследовании в пользу однородного охвата территории, в то время как другие (например, Австрия) проводили популяционные взвешенные оценки концентрации радона, когда плотность отбора проб была пропорциональна плотности населения. Пять стран (Германия, Чехия, Швейцария, Испания и Финляндия) провели более детальные обследования в районах с высоким содержанием радона. Некоторые данные (Эстония, Греция, Румыния и Польша) основаны главным образом на обследованиях радоноопасных районов. Некоторые регионы на карте по разным причинам остаются необследованными до сих пор. Некоторые страны (например, Ирландия) выбрали дизайн обследования, данные которого несовместимы с европейским картографическим проектом, а некоторые (например, Швеция) не имеют национальной базы данных. В целом карта указывает на статус национального обследования радона в помещениях в Европе.

По результатам проведенных обследований было построено распределение ячеек с различными значениями средней годовой концентрации радона в помещениях на первом этаже зданий по территории стран Европы, которое показано на рис. 7.3. Рассматривая вариации концентраций радона в зданиях по всей Европе (рис. 7.3), следует отметить, что они, по сути, отражают особенности геологической основы регионов континента. Регионы с высокой концентрацией радона обнаруживаются в гранитных районах Богемского массива (the Bohemian Massif), Иберийского полуострова (Peninsula the Iberian), Центрального массива (the Massif Central), Финноскандинавского щита (the Fennoscandian shield), Корсики (Corsica), гор Корнуэлл и Вогезов (Cornwall and the Vosges Mountains), в кристаллических породах Центральных Альп и карстовых скалах Юра и Динаридес в Швейцарии и отдельных вулканических структурах Центральной Италии.

Анализируя процент ячеек, в которых референтные значения 100 и 300 Бк/м<sup>3</sup> превышены (эти значения выбраны в соответствии с рекомендациями ВОЗ и новыми Европейскими основными нормами безопасности [2,7]), можно оценить степень актуальности радоновой проблемы

для отдельных стран. Эти оценки имеют ориентировочный характер, хотя бы потому, что число измерений в ячейке 10x10 км колеблется от 1 до 24 000 (последняя цифра приведена для Великобритании).

Для всех представленных стран (рис. 7.3) более 30 % из заполненных ячеек имеют среднее арифметическое значение годовой концентрации радона в помещениях более 100 Бк/м<sup>3</sup> и 4,2 % – более 300 Бк/м<sup>3</sup>. Для отдельных стран эти значения колеблются в широких пределах. В Чехии – 90 % всех обследованных ячеек имеют среднее арифметическое значение годовой концентрации радона, превышающее 100 Бк/м<sup>3</sup>, в Норвегии – 70 %, в Швейцарии – 54 %, в Финляндии



*Рис. 7.3. Среднеарифметические значения долговременных измерений концентрации радона для ячеек 10x10 км на нижних этажах зданий по состоянию на 2014 г. [8, 10]*

и Австрии – 40 %, в Италии – 38 %, в Бельгии и Франции – 28 %. В Испании и Португалии – около 24 %, в Германии – 16 %, в Литве, Великобритании и Греции – менее 10 %. В Нидерландах ни одна из обследованных ячеек не имеет значений годовой концентрации радона в помещениях выше уровня 100 Бк/м<sup>3</sup> [8, 10]. Эти примеры демонстрируют различия проблемы радона для европейских стран и тем самым определяют особенности национальных планов действий по снижению радоновой опасности.

Наряду с созданием Карты концентраций радона в жилищах ЕС приступил к разработке Европейской геогенной радоновой карты [15–17]. Известно, что концентрация радона в помещении сильно зависит не только от природных (геологических), но и от антропогенных факторов, таких как типы конструкций зданий, строительные материалы, а также бытовые привычки людей, которые изменяются во времени и характерны для каждого дома. Объединенный исследовательский центр ЕС предложил создать карту, которая отражала бы переменную, характеризующую то, «что поставляется земля» в плане радонового потенциала (РП). Эта величина, не зависящая в идеале от антропогенных факторов и постоянная во времени по геологической шкале времени, называется геогенным радоновым потенциалом. В настоящее время ЕС приступил к созданию такой карты (КГРП), идея которой тесно связана с идентификацией радоноопасных районов (*radon-prone areas*). Для сведения следует отметить, что определение «радоноопасные районы (*radon-prone areas*) в новых Европейских основных нормах безопасности (в основном по семантическим причинам) было переформулировано следующим образом: «области, где концентрации радона (в среднем за год) в значительном количестве зданий, как ожидается, превышают соответствующий национальный референтный уровень» [7].

Европейская геогенная радоновая карта может служить инструментом в поддержке государств-членов в выполнении национальных планов действий, которые в соответствии с новой директивой ЕС должны быть приняты всеми странами-членами ЕС.

Кроме указанных карт, ЕС планирует создать Европейский атлас естественной радиации, который должен содержать сборник карт

Европы, отображающих уровни естественной радиоактивности, вызванные различными источниками (радон в помещениях и окружающей среде, космическое излучение, наземная гамма-радиация и вода). Общая цель Атласа заключается в объединении всей информации разных карт, что позволит оценивать годовую дозу, которую население может получать от облучения природными источниками [9].

Основываясь на изложенной выше информации, представляется возможным осуществить обзор деятельности стран ЕС по защите населения от облучения радоном на примере только отдельных стран. Этот подход позволит избежать повторения содержания мероприятий, которые во многом идентичны в реализуемых странами ЕС национальных планах действий. При выборе стран учитывались оценки среднегодовых значений концентрации радона, а также опыт и особенности реализации национальных радоновых программ. Руководствуясь этими положениями, ниже приведен обзор доступной информации о мероприятиях по снижению радоновой опасности для стран Западной Европы с различными средними значениями объемной активности радона в жилищах, колеблющимися в широких пределах (Чехия – 140 Бк/м<sup>3</sup>, Финляндия – 120 Бк/м<sup>3</sup>, Швеция – 102 Бк/м<sup>3</sup>, Австрия – 97 Бк/м<sup>3</sup>, Норвегия и Ирландия – 89 Бк/м<sup>3</sup>, Швейцария – 77 Бк/м<sup>3</sup>, Франция – 63 Бк/м<sup>3</sup>, Бельгия – 48 Бк/м<sup>3</sup>, Великобритания – 20 Бк/м<sup>3</sup>), а также для США, Канады и Российской Федерации.

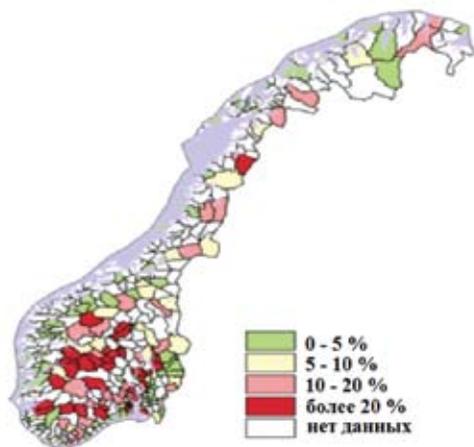
Опыт деятельности государств Европы, США и Канады по снижению радоновой опасности важен для Российской Федерации в плане оптимизации работ, проводимых в нашей стране по защите населения от воздействия радона и других природных источников излучения.

### **Норвегия**

Концентрации радона внутри помещений в Норвегии являются одними из самых высоких в Европе. Оценка ежегодной взвешенной по населению концентрации радона в жилищах составляет около 89 Бк/м<sup>3</sup>, при этом 10 % жилищного фонда характеризуется значениями среднегодовой объемной активности радона более 200 Бк/м<sup>3</sup> [18].

Первые радоновые обследования в Норвегии были начаты в 1970-х и 1980-х г. и включали как рудники, так и жилища. Первые рекомендации по радону в жилых помещениях были изданы в 1980-х г. [19, 20].

В 2000–2003 г. Норвежское агентство по радиационной защите (NRPA) в сотрудничестве со 158 муниципалитетами провело национальное радоновое обследование по картированию радона, в ходе которого было обследовано примерно 29 000 жилищ [21–23]. На рисунке 7.4 приведена карта, показывающая для 189 муниципалитетов Норвегии процент жилищного фонда, для которого превышен уровень 200 Бк/м<sup>3</sup>.



**Рис 7.4.** Процент жилищного фонда, для которого превышен уровень 200 Бк/м<sup>3</sup> (Норвежское агентство по радиационной защите ©, Strand. et al., 2005, <http://radon.nrpa.no>).

Выполненные в Норвегии предварительные оценки годового количества смертей от радониндуцированного рака легкого (при средней концентрации радона в помещениях 88 Бк/м<sup>3</sup>) составляют 300 смертей в год [18]. Используя логарифмически–нормальное распределение, рассчитано, что 70 % этих смертей происходят при концентрации радона в помещении, не превышающей 200 Бк/м<sup>3</sup> [18]. При

концентрации радона  $100 \text{ Бк/м}^3$  (эта величина не сильно отличается от среднего значения для помещений в Норвегии) риск смерти от радониндуцированного рака легкого в возрасте до 75 лет составляет 0,1 % для не куривших и 2 % для курящих [24].

Для защиты населения от воздействия радона с учетом рекомендаций ВОЗ была разработана новая стратегия [24]. Роль национального органа по ее формированию была возложена на Норвежское министерство здравоохранения и социального обслуживания, которое в 2007 г. организовало межведомственную рабочую группу. Рабочая группа состояла из представителей Министерства окружающей среды, Норвежского управления инспекции труда, Национального бюро строительных технологий и управления, Государственного жилищного банка, Национального института общественного здравоохранения, Управления здравоохранения Норвегии и г. Осло. Норвежское агентство по радиационной защите выступило в качестве секретариата рабочей группы.

Особенность деятельности по формированию радоновой стратегии состояла в том, что одновременно с межведомственной группой была создана референс-группа с участием представителей профсоюзов и неправительственных организаций, которые представляют заинтересованные стороны в решении радоновой проблемы и эффективно способствуют осведомленности населения о проводимых работах. Референс-группа комментировала на всех этапах предлагаемые межведомственной рабочей группой меры [18].

При подготовке национального плана действий Норвежским агентством по радиационной защите был проведен анализ его экономической эффективности. Было показано, что для условий Норвегии корректирующие действия по снижению радона в существующих зданиях при уровнях выше  $200 \text{ Бк/м}^3$  являются экономически эффективными (Stigum and Strand, 2003). Были проведены также оценки экономических затрат при установлении предельного значения для концентрации радона в помещениях в  $100 \text{ Бк/м}^3$  [24]. Так, стоимость предотвращения возникновения рака легкого при уменьшении действующего предела до  $100 \text{ Бк/м}^3$  составит 3 млн норвежских крон, что эквивалентно стоимости

в размере 170 000 и 210 000 норвежских крон (NOK) на год спасенной жизни. Средняя стоимость общих затрат на обследование и корректирующие действия оценивается для детского сада и школы в 3000 и 7000 NOK соответственно. Расходы на тотальные обследования и корректирующие действия для всех детских садов были оценены приблизительно в 20 млн NOK, для начальных и средних школ – приблизительно в 20 млн NOK и для колледжей дальнейшего образования и центров высшего образования – около 10 млн NOK. Сметная средняя стоимость обследования и корректирующих действий на единицу съемного жилья составляет примерно 1700 NOK, а общие затраты – приблизительно 900 млн NOK. Расходы на превентивные меры с использованием защитных пленок (мембран) при строительстве новых зданий оцениваются приблизительно в 17 000 NOK на 100 м<sup>2</sup> площади пола.

По результатам деятельности межведомственной рабочей группы Норвежское правительство в июле 2009 г. приняло новую национальную радоновую стратегию по снижению воздействия радона [24], которая гармонизирована с рекомендациями ВОЗ и ориентирована на две стратегические цели:

- снижение уровня концентрации радона во всех зданиях и помещениях до установленных пределов;
- создание условий для снижения воздействия радона в Норвегии до разумно достижимого низкого уровня, используя принцип ALARA.

Национальная стратегия должна быть реализована в пятилетний период 2009–2014 гг. на основе годовых национальных бюджетов, грантовых программ и соответствующих правительственных документов. Для управления и координации работ по реализации стратегии Норвежское Управление по радиационной защите (NRPA) создало координационную группу из различных представителей, имеющих непосредственное отношение к радону. NRPA отслеживало выполнение стратегии и докладывало о ходе выполнения задач Министерству здравоохранения и социального обслуживания.

Непосредственно радоновая стратегия состояла из шести суб-стратегий (их можно рассматривать как отдельные направления на-

ционального плана действий), которые имеют отдельные цели и предложенные для их достижения мероприятия:

- радон в области территориального планирования;
- радон и строительство новых зданий;
- радон в существующих жилищах;
- норвежские общины, имеющие особенно серьезные проблемы, связанные с радоном;
- радон в зданиях и помещениях, в которые допускается широкая общественность;
- радон на рабочем месте.

Полный перечень мероприятий по выполнению субстратегий приведен в тексте «Стратегии по снижению облучения радоном в Норвегии» [24]. Эти мероприятия подготовлены с учетом рекомендаций ВОЗ, Северного управления радиационной защиты (The Nordic Radiation Protection Authorities) и соответствуют выпущенным позже Публикации 126 МКРЗ «Радиационная защита от облучения радоном» и Руководству МАГАТЭ «Защита населения от облучения радоном и другими природными источниками излучения в помещении». Особенности выполненных и планируемых действий по реализации субстратегий, характерные для Норвегии, состоят в следующем.

С целью усовершенствования нормативно-правовой базы принят максимальный предел по содержанию радона для новых жилищ, детских садов, школ и арендуемого жилья – 200 Бк/м<sup>3</sup>. Установлен предел в 100 Бк/м<sup>3</sup> как уровень действий. Эти лимиты соответствовали рекомендациям ВОЗ и Северного управления радиационной защиты (<http://www.npra.no/dav/a4c7e5d25d.pdf>). В 2009 г. внесены изменения в Закон о планировании и строительстве (the Planning and Building Act), обязывающие местные органы власти при территориальном планировании учитывать классификацию земель по их потенциальной радоновой опасности. Установлены требования к новым строящимся зданиям, которые должны содержать концентрации радона на разумно достижимом низком уровне и всегда менее 200 Бк/м<sup>3</sup>. Должна быть значительно снижена к 2020 г. доля домов с концентрацией радона, превышающей 200 Бк/м<sup>3</sup>. Все школы и дет-

ские сады должны иметь в помещениях концентрацию радона ниже 200 Бк/м<sup>3</sup>. Все норвежские общины, имеющие особенно серьезные проблемы, связанные с радоном (большая часть зданий имеет объемную активность радона на уровне 2000–5000 Бк/м<sup>3</sup>), должны быть нанесены на карту. Для здоровья их жителей должны быть обеспечены приемлемые условия за счет внедрения необходимых мер. Необходимо обеспечить в зданиях рабочие места с приемлемыми концентрациями радона для полностью адекватной рабочей среды, оптимальной для здоровья и безопасности работников. Особое внимание должно быть уделено деятельности по повышению осведомленности общественности о радоне.

### **Финляндия**

Концентрации радона внутри помещений в Финляндии (как в Норвегии и Швеции) являются одними из самых высоких в Европе. Из 2000 случаев смерти от рака легкого в год 300 являются радон-индуцированными, то есть около 14 % (5–25 %) всех случаев рака легкого. При этом 85 % из 300 случаев относится к курильщикам и лишь 40 случаев обусловлены только действием радона [25].

В настоящее время в Финляндии нет официально оформленного национального плана действий по снижению радоновой опасности, а его принятие планируется в соответствии с рекомендациями новых базовых стандартов безопасности ЕС. Несмотря на это, Финляндия уже длительное время проводит широкий комплекс мероприятий по снижению радоновой опасности.

Регулирование радоновой проблемы осуществляется Министерством социальных дел и здравоохранения, которым установлено, что объемная активность радона в существующих помещениях не должна превышать 400 Бк/м<sup>3</sup>, в новых зданиях – 200 Бк/м<sup>3</sup> [26]. При превышении ОА уровня 400 Бк/м<sup>3</sup> для существующих зданий принимаются корректирующие действия, а при строительстве применяется широкий комплекс превентивных мер [25, 27].

Особый интерес представляют результаты деятельности Управления радиационной и ядерной безопасности Финляндии (STUK) по организации последовательного тестирования радона. Начиная с

1980-х г., управление осуществляет измерения содержания радона в финских домах с использованием альфа-трековых детекторов [28]. По результатам этой деятельности была создана база данных, которая к 2008 г. содержала измерения, выполненные в 70000 индивидуальных домах, в 17000 двухквартирных блочных домах и 5000 квартирах [29]. При проведении измерений жителями заполнялась анкета-вопросник о строительных характеристиках, таких как тип фундамента и вентиляции, а также об особенностях проведенных корректирующих действий или превентивных мер. Оплата большинства измерений осуществлялась за счет жильцов.

Проводятся целевые обследования, основанные на репрезентативной выборке. В настоящее время в Финляндии было два общенациональных радоновых обследования с использованием рандомизированной случайной выборки объемом около 3000 случаев в каждой. Во время первого обследования 1990–1991 гг. общенациональная средняя концентрация радона составила 145 Бк/м<sup>3</sup> в жилых домах и 82 Бк/м<sup>3</sup> в квартирах [30]. Во втором обследовании в 2006–2007 гг. соответствующие значения составили 121 Бк/м<sup>3</sup> и 49 Бк/м<sup>3</sup> [31]. Разница в двух обследованиях (145 Бк/м<sup>3</sup> в 1991 г. по сравнению с 121 Бк/м<sup>3</sup> в 2006 г.) связана частично с более высокой температурой наружного воздуха в течение последнего обследования, а также с реализацией реабилитационных мероприятий в домах, построенных до 1991 г.

Используя эти результаты, разработали (альтернативные общенациональным радоновым обследованиям) расчетные методы оценки репрезентативных национальных и региональных средних концентраций радиоактивного газа-радона, которые позволяют установить эти значения в ячейках 1х1 км, взвешенные относительно плотности жилищ [29]. Рассчитанная с помощью этих методов национальная средняя концентрация радона в домах (за исключением квартир) составили 137 Бк/м<sup>3</sup>. Эта оценка расположена между статистически достоверными значениями 145 Бк/м<sup>3</sup> и 121 Бк/м<sup>3</sup>, полученными в результате национальных выборочных обследований в 1990 и 2006 г., соответственно. Используя эти расчетные методы, созданы радоновая карта Финляндии с указанием концентраций радона на уровне конкретных муниципалитетов, а также кривые, отображающие среднюю

концентрацию радона за строительный год, рассчитанные с использованием взвешенного по плотности жилья метода.

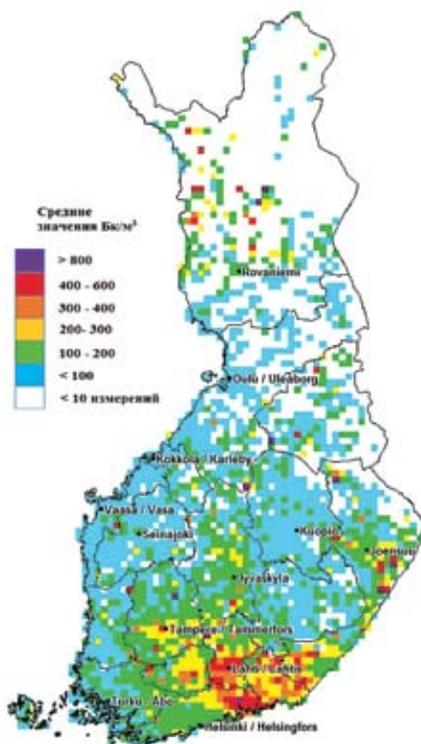
Использование расчетного взвешенного по плотности жилья метода является альтернативой репрезентативным выборочным исследованиям, выгодно отличающимся по критериям экономической эффективности.

Результаты этих измерений, дополненные данными других организаций, позволили создать обширную национальную базу данных по радону, которая содержит информацию о концентрации радона в жилище с указанием его адреса, типа здания и измеряемого пространства, типа фундамента, проведенных мерах по корректирующим действиям и т. п. Имеются карты и отчеты о концентрации радона, указана адресная информация. На основании собранной информации оцениваются средние концентрации и процент домов, в которых превышен установленный уровень действия, осуществляется выявление радоноопасных зон и т. п. Сформированы регистры хорошего качества, позволяющие осуществлять связь с другими национальными регистрами. База данных использована для создания и последующего обновления радоновых карт и опубликованного в Финляндии Национального радонового атласа [32].

В качестве иллюстрации на рис. 7.5 представлена карта, отображающая данные о распределении по территории Финляндии среднегодовых концентраций радона в помещениях [29].

База данных была использована для оценки соотношения облучения радоном в жилищах, а также на рабочих местах и в общественных зданиях. Из общего облучения радоном 95 % приходится на дома, 5 % – на рабочие места и общественные здания. Измерение концентрации радона на рабочих местах (шахты, школы, общественные здания) носит рекомендательный характер и проводится в настоящее время только в отдельных муниципалитетах [25].

Информация, накопленная за многие годы о динамике концентраций радона в жилищах, положена в основу проведения и оценки эффективности превентивных мер и корректирующих действий. В национальном строительном кодексе Финляндии при планировании новых зданий установлен референтный уровень 200 Бк/м<sup>3</sup> (Министер-



*Рис. 7.5. Карта среднегодовых концентраций радона на территории Финляндии [29]*

ство охраны окружающей среды, 2004 г.). Начиная с 2004 г, нормативами Министерства охраны окружающей среды установлено, что в разрешение на строительство новых зданий должен быть включен в виде приложения технический план по радону. Этот план может быть исключен только при строительстве в районах, где уровень более 200 Бк/м<sup>3</sup> наблюдается редко.

Принятие соответствующих строительных кодов и ответственность строительных организаций [27] позволили достичь хороших результатов по дальнейшему снижению уровня радона при строительстве новых зданий. Применение превентивных мер при строительстве зданий показало хорошую динамику снижения в них концентраций

радона, особенно в радоноопасных районах. В этих районах в новых зданиях к 2005 г. объемная активность радона в течение 5 лет наблюдения снизилась на 11 %, а в остальных районах на 4,5%. Эти изменения связаны с внедрением новых радонрезистентных технологий, применением приточно-вытяжной вентиляции и других современных методов строительства. Для существующих зданий разработано практическое руководство по корректирующим действиям и мероприятиям, при проведении которых государством предусмотрено оказание некоторой финансовой поддержки.

В Финляндии деятельность по снижению опасности от воздействия радона осуществляется с достаточно широким привлечением общественности. Тем не менее, отмечается необходимость развития коммуникационных технологий, особенно в сфере строительных технологий и научных исследований.

Дальнейшие перспективы деятельности по снижению опасности от воздействия радона в Финляндии будут формироваться в рамках национального плана действий (НПД), принятие которого рекомендовано новыми базовыми стандартами безопасности ЕС. В рамках подготовки к принятию НПД в Финляндии предусматривается комплексное решение связанных между собой проблем энергосбережения, качества воздуха в помещениях и снижения концентраций радона, а также поиск оптимальных путей поддержки (в том числе финансовой) мер по измерению концентраций радона и проведению реабилитации в районах с высоким его содержанием. Необходимы новые меры по осведомленности общественности о риске связи радона и курения. Последующие действия по снижению воздействия радона в жилых помещениях требуют принятия новых норм и руководств по регулированию радиационной безопасности и нового строительного кодекса. Необходимо расширение национальных и местных кампаний по повышению осведомленности населения, измерению концентраций радона, реабилитационным мероприятиям. Большое внимание должно быть уделено обучению, образованию и информированию на основе развития сотрудничества между органами власти разных уровней, экспертами и специалистами, широкого использования онлайн материалов, рекомендаций экспертов и т.п.

## Швеция

Швеция имеет более чем 30 летний опыт в решении радоновой проблемы, который реализуется комплексно в рамках национального плана действий. Положения этого плана включают тестирование радона, применение превентивных мер и корректирующих действий для снижения его уровня в помещениях строящихся и существующих зданий с учетом всех источников поступления радона: почвы, строительных материалов и подземных вод.

Указанная деятельность направлена на достижение экологической цели, предусматривающей снижение концентрации радона ниже 200 Бк/м<sup>3</sup> во всех жилых помещениях к 2020 г., а в школах и детских садах к 2010 г. [33].

Многие из мер, предусмотренных в национальном плане действий, успешно выполняется. Деятельность по снижению радоновой опасности в Швеции во многом совпадает с мерами, принимаемыми в Норвегии и Финляндии, рассмотренными достаточно подробно выше. В связи с этим представляется целесообразным не излагать детально национальный план действий Швеции, а остановиться на отдельных аспектах, требующих дополнительного рассмотрения в плане их совершенствования

В Швеции распределение ответственности по реализации национального плана действий, как и во многих других странах, разделено между центральным, региональным и местным уровнями. Деятельность осуществляется на основе межведомственного взаимодействия, в которую вовлечены Агентство общественного здравоохранения, Управление по радиационной безопасности, Национальный совет по жилью, строительству и планированию, Агентство по работе с окружающей средой, Национальная администрация питания, Геологическая служба, муниципалитеты и окружные советы, Шведский совет по аккредитации и оценке соответствия, Национальный институт общественного здравоохранения. Важную роль играют 290 муниципалитетов [33].

В Швеции было организовано 3 национальных обследования (последнее в период 2004–2006 гг.). Кампании осуществлялись мест-

ными органами власти, а их результаты не были объединены на национальном уровне. Однако известно, что к 2005 г. были проведены измерения примерно в 500 000 жилищ, что составляет около 10 % жилого фонда страны. Полученная оценка ежегодных средних значений уровня радона в жилищах в Швеции (это приблизительно 4,5 млн жилищ) составила 108 Бк/м<sup>3</sup>, при этом число помещений с уровнями от 200 до 400 Бк/м<sup>3</sup> равно примерно 6–7 %, а с уровнями свыше 400 Бк/м<sup>3</sup> – около 4 % [33, 10, 34]. Карты радонового риска выпускаются в Швеции с 1979 г. Они основаны на различных типах информации: геологической и геотехнической, радиометрических исследованиях воздуха, измерениях почвенного газа радона в жилищах и на рабочих местах. Карты радонового риска доступны только на муниципальном уровне. На национальном уровне таких карт нет. Проведены значительные работы по измерению почвенного газа радона, которые постоянно проводятся с 1979 г., в результате чего накоплена информация о нескольких тысячах образцов [35–37].

Несмотря на позитивные стороны деятельности по снижению радоновой опасности в Швеции, специалистами отмечаются ее существенные недостатки. Это связано с тем, что в Швеции ни один орган не несет основной ответственности за координацию работ по радоновой проблеме на национальном уровне. Полномочия, которые не определены в качестве сферы ответственности конкретного органа или не являются приоритетом его деятельности, не получают должного внимания и развития. Общественность часто путается в разделении обязанностей между ними. В Швеции нет правительственного органа, работающего в области реабилитационных мероприятий или последующего развития техники для их проведения. В качестве шага, направленного на совершенствование координации работ, недавно была основана Шведская ассоциация консультантов по радону.

Требует стимулирования, заинтересованности, развития система контроля за облучением радоном на местах. В этом плане важна не только финансовая поддержка, которая предоставляется домовладельцам для устранения высокой концентрации радона, но и официально сформулированная национальная цель, предусматривающая уменьшение количества лиц, подвергающихся воздействию высоких

уровней радона, что в конечном итоге должно привести к снижению смертности от рака легкого.

Требуется своего решения и проблема создания национальной базы данных по радону. Измерения радона проводятся отдельными частными компаниями, поэтому в настоящее время на национальном уровне не удается систематическим способом управлять этими данными.

Поскольку предотвратить поступление радона в здания вряд ли возможно в Швеции, то существует потребность в инновационном мышлении в плане превентивных мер. Требуется своего решения вопрос о необходимости финансовой поддержки исследований в этой области.

Вся территория Швеции является регионом с потенциально высокой концентрацией радона. Поэтому акцент делается не на разграничение зон риска (высокий, средний или низкий риск), а на развитие стратегии системных проверок и доказательств наличия определенных концентраций радона.

В заключение следует отметить, что, столкнувшись с указанными выше вызовами при реализации национального плана действий, в Швеции по-прежнему считают, что основными проблемами являются: взаимодействие между всеми ответственными органами; потребность в сотрудничестве с научными академиями; информирование общественности о риске; снижение уровня радона на рабочих местах.

### **Австрия**

В Австрии еще в начале XX в. было начато измерение содержания радона в воде, а в его середине – в воздухе. До 1972 г. было проведено несколько тысяч измерений радона в воздухе на рабочих местах (пещерах, шахтах) и в домах. Позже были проведены измерения в Инсбруке, Зальцбурге и Вене, но до 1991 г. это были несистематические и нескоординированные исследования [38, 39].

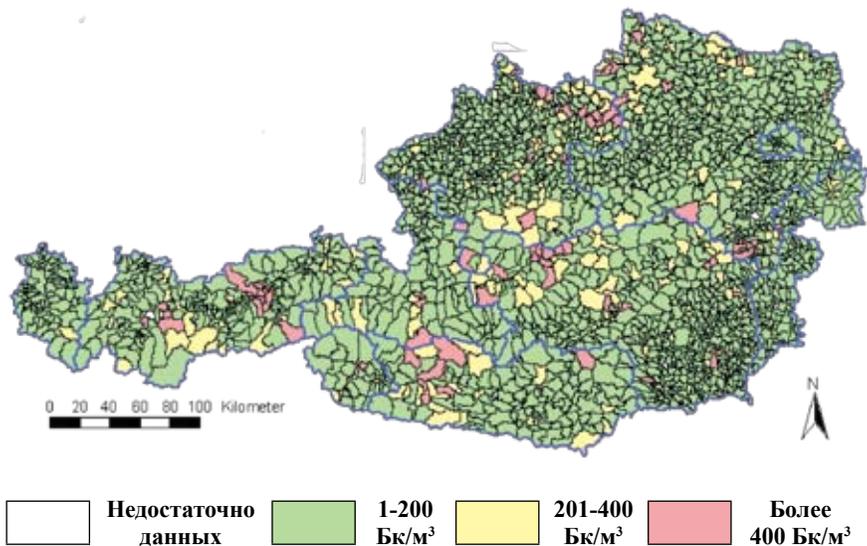
В 1991 г. был начат проект по оценке радоновой обстановки в Австрии с целью формирования концепции национальной радоновой программы. Основываясь на публикациях ЕС и МКРЗ 90-х г., Австрийской комиссией по радиационной защите в 1992 г. были уста-

новлены для радона уровни действия 400 и 200 Бк/м<sup>3</sup> соответственно для существующих и новых зданий. Также были изданы рекомендации по созданию карты радонового потенциала Австрии и разработаны руководящие принципы корректирующих действий и превентивных мер по уменьшению концентраций радона в помещениях [40].

Регулирование радона внутри помещений в Австрии не является предметом специального законодательства и рассматривается в упомянутых выше рекомендациях Австрийской комиссии радиационной защиты. С другой стороны, радон на рабочих местах нормируется в соответствии с законом о радиационной защите 2006 г. и постановлением о природных источниках излучения 2008 г. Постановление распространяется на следующие четыре рабочие области: водоснабжение, подземные рабочие места в шахтах, туннелях и др., демонстрационные пещеры и туристические шахты, а также радоновые курорты. До сих пор реакция заинтересованных компаний на законное требование по оценке облучения радоном персонала была очень слабой. Ряд австрийских стандартов был выпущен и касается методов измерения радона и области их применения, техники превентивных мер и корректирующих действий в зданиях [41–43].

Деятельность по снижению облучения радоном внутри помещений осуществлялась в рамках работ под названием Австрийской радоновый проект (ÖNRAP), основные усилия которого были направлены на создание австрийской радоновой карты. Особенности и результаты этой деятельности представляют определенный интерес для специалистов в области радиационной защиты. Для создания первой радоновой карты в период 1992–2004 г. было проведено измерение содержания радона в 20 000 австрийских домах. Стратегия обследования включала измерение радона в наиболее посещаемых помещениях (в гостиных и спальнях комнатах), рандомизированный выбор домов, плотность измерений была пропорциональна плотности населения. Однако при этом не учитывались геология, дочерние продукты распада и отдельные группы населения (учителя, пожарные и т. п.), а плотность измерений была постоянной (например, по сетке). Полученная оценка ежегодных средних значений уровня радона в жилищах в Австрии составила 97 Бк/м<sup>3</sup>, при этом число помещений с уровнями

от 200 до 400 Бк/м<sup>3</sup> составило примерно 8 %, а с уровнями свыше 400 Бк/м<sup>3</sup> – около 4 % [10, 44, 45]. На рис. 7.6 представлены значения средних ежегодных концентраций радона на местном уровне.



*Рис. 7.6. Карта средних ежегодных значений концентраций радона на местном уровне. (ÖNRAP, Г. Фридман © (2005), [http://www.univie.ac.at/Kernphysik/oenrap/onrap\\_e.htm](http://www.univie.ac.at/Kernphysik/oenrap/onrap_e.htm)).*

Дальнейшие мероприятия по совершенствованию созданной радоновой карты были направлены на унификацию измерений на основе использования трековых детекторов и оптимизацию их распространения, использование всех доступных данных об уровне гамма-фона, содержания урана в почве, измерения почвенного газа, сравнение данных кратковременного и длительного тестирования, распространение вопросников, учета фактора равновесия между радоном и ДПР и т. п. С учетом этих данных к 2012 г. было обследовано 2354 муниципалитета и сформирована карта радонового потенциала, проведены оценки геогенного радонового риска. 567 муниципалитетов были отнесены к зонам потенциального риска 2-го (средний радоновый риск, уровни содержания радона в помещениях – 200–400 Бк/

м<sup>3</sup>) и 3-го класса (высокий радоновый риск, уровни радона в помещениях – более 400 Бк/м<sup>3</sup>) [45].

В настоящее время принята программа радонового обследования на 2013 г. и последующие годы, которая позволит снизить влияние многих неопределенных источников, имевших место на предыдущих этапах создания радоновой карты. В этих целях предусматривается использование только трековых детекторов, расчет средних значений на основе двух полугодовых измерений концентрации радона, проведения измерений, по меньшей мере, в 12 жилищах на 1 муниципалитет, использование геологических данных в сетке 2 x 2 км. На основе этих данных в провинции Верхняя Австрия (выбрана в качестве пилотного проекта) к 2015 г. проведено уточнение карты радонового потенциала. В последующем предполагается провести указанные работы для всей территории Австрии [45].

Результаты, полученные в ходе создания радоновых карт, используются для целенаправленного проведения превентивных мер и корректирующих действий для зданий с повышенным содержанием радона [38, 46]. Оценка влияния строительных характеристик и геологии (в основном почвенного газа радона) осуществляется на основе изучения вариации радона от жилища к жилищу в пределах муниципального образования. Комплексное радоновое обследование проводится в трех муниципалитетах. Результаты этих работ также используются для обучения местных специалистов строительной отрасли смягчению последствий воздействия радона в жилищах, а также для повышения осведомленности в отношении радона в муниципалитетах и за его пределами. Проводятся исследования по тестированию различных методов смягчения воздействия радона, адаптированных для типичных австрийских домов (на примере трех типов домов), чтобы накопить необходимый опыт и оценить типичные затраты на смягчение последствий. Осуществляются исследования по быстрой оценке эффективности корректирующих действий. Организованы также исследования по изучению изменений уровня радона в зависимости от показателей воздухообмена, использования тепло- и энергосберегающих технологий [38, 43].

Проводятся измерения содержания радона на рабочих местах: детские сады, школы, мэрии, другие общественные здания, а также туристические шахты, демонстрационные пещеры и системы водоснабжения. За последние 10 лет был определен уровень радона в 800 детских садах, 350 школах и 450 общественных зданиях (в основном в провинции Верхняя Австрия). 2,6 % всех детских садов и школ, а также 1,6 % городских учреждений имеют уровень радона около 1000 Бк/м<sup>3</sup>, при этом 5,9 % детских садов и школ, а также 12 % городских учреждений – свыше 400 Бк/м<sup>3</sup> [47–50]. Измерения концентрации радона в источниках водоснабжения показали достаточно низкие значения: ниже 1000 Бк/м<sup>3</sup> для 55 % всех измеренных источников, ниже 5000 Бк/м<sup>3</sup> для 91 % источников, а максимальное значение составило 38 700 Бк/м<sup>3</sup> [51, 52].

Осуществляются программы информирования общественности, с которыми можно ознакомиться на веб-сайтах ([www.strahlenschutz.gv.at](http://www.strahlenschutz.gv.at), <http://homepage.univie.ac.at/harry.friedmann/Radon/welcome.htm>).

В 2006 г. на основе закона о радиационной защите был создан Австрийский радоновый центр при Центре компетенции по радиоэкологии и радону Австрийского агентства по здравоохранению и продовольственной безопасности. Основной задачей центра является координация усилий по радоновой проблеме в Австрии. Ближайшая задача состоит в проектировании и реализации австрийской радоновой базы данных, а также настройка и сопровождение официального радонового веб-сайта.

В заключение необходимо отметить, что за последние 20 лет решение радоновой проблемы в Австрии осуществлялось с помощью набора большого числа проектов и исследований. Эти усилия стали основой для количественной оценки радоновой проблемы и принятия решений по снижению радоновой опасности. Однако фактическое воздействие этих мероприятий в плане снижения риска радона было очень мало. Приоритет был отдан наблюдению за лицами с высоким индивидуальным радоновым риском (т. е. тем, кто подвергается высоким уровням облучения радоном у себя дома или на работе). Вместе с тем только в 0,07 % из 70 000 существующих зданий, в которых, как ожидалось, превышен уровень действия в 400 Бк/м<sup>3</sup>, были проведены

мероприятия по снижению опасного воздействия радона. Из-за отсутствия правовых требований к осуществлению профилактических мер в новостройках (по крайней мере, в районах, подверженных воздействию высоких концентраций радона) количество защищенных от радона строящихся зданий незначительно. Принимая во внимание, что в Австрии общий жилищный фонд увеличился более чем на 70 % за последние 40 лет, это явно упущенная возможность для снижения коллективного риска от облучения радоном. До сих пор реакция заинтересованных компаний на законное требование по оценке облучения радоном персонала была очень слабой. Наконец, несмотря на изданные папки, брошюры, веб-сайты, информированность общественности по-прежнему остается очень низкой [38].

Учитывая результаты проведенных радоновых исследований, для Австрии наиболее актуальной задачей является разработка национального плана действий в соответствии международными рекомендациями, изложенными в публикациях МКРЗ, МАГАТЭ по радоновой проблеме и новыми требованиями изданной в 2014 г. директивы ЕС.

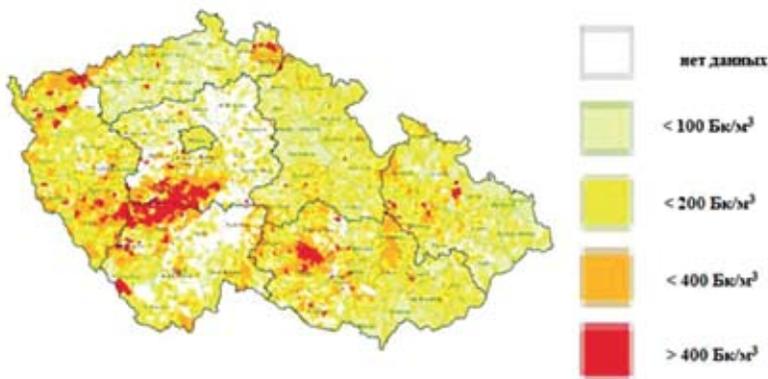
### **Чешская Республика (ЧР)**

Концентрации радона внутри помещений в Чехии до настоящего времени являются одними из самых высоких в мире. Проведенное в 1985–1992 г. репрезентативное обследование радона в 2000 квартир показало среднее значение 140 Бк/м<sup>3</sup>. Оценка средней объемной активности радона в жилищах составляет около 119 Бк/м<sup>3</sup>, при этом концентрация радона примерно в 60–70 тысячах домов выше 400 Бк/м<sup>3</sup>, максимальное значение составляет 20 000 Бк/м<sup>3</sup>, а по некоторым данным – 70 000 Бк/м<sup>3</sup> [53, 10, 54].

Оценка годового количества смертей от радон-индуцированного рака легкого составляет около 900 смертей в год. Учитывая, что каждый год в Чехии умирают от рака легкого более 5000 человек, можно констатировать, что около 18 % смертей среди этого количества лиц являются радон-индуцированными [55].

В Чехии накоплен более чем 30 летний опыт мероприятий по снижению опасности облучения радоном населения страны. Измерительные кампании, организованные на постоянной основе и нача-

тые в 1985 г., позволили обследовать более 180 тысяч жилищ [56]. Создана карта среднегодовых значений объемной активности радона в помещениях всех муниципалитетов Чешской Республики, которая представлена на рис. 7.7 [53]. С 1995 г. проводятся измерения объемной активности радона в почвенном воздухе во всех геологических единицах республики. В настоящее время имеется информация о 9 тысячах отдельных площадок, где проведены эти измерения. В Чехии являются обязательными предварительные измерения почвенного газа-радона, которые должны быть выполнены до начала строительства новых или реконструкции существующих зданий [57–59].



**Рис. 7.7.** Карта значений среднегодовой объемной активности радона (геометрическое среднее) в жилищах всех муниципалитетов Чешской Республики (SURO © (2005).  
Web address <http://www.suro.cz/en/prirodni/mapy/index>.

Начало реализации мероприятий по снижению радоновой опасности в Чешской республике также относится к 70–80 г. прошлого столетия. Это было связано с острой необходимостью реабилитации домов, построенных в 1900–1985 гг. из строительных материалов (штукатурка, известь, пенобетон, шлаки), содержащих значительное количество радия-226. Среди них было выделено 3 группы домов в зависимости от содержания радия-226 в применяемых строительных материалах [53]. Первая группа – это дома г. Яхимове (Йохимстали), при строительстве которых использовали штукатурку и известь с со-

держанием радия-226 до 1 МБк/кг. Вторая – около 20 тысяч домов, построенных с использованием автоклавированного пенобетона с содержанием в нем радия-226 около 1 кБк/кг, а также третья группа зданий из шлакобетона с содержанием в нем радия-226 около 3 кБк/кг. Деятельность по реабилитации этих трех типов зданий в 70–80 г. прошлого века считается в Чехии началом радоновой программы [53]. В ходе этой работы часть домов в г. Яхимове была разрушена и строительные отходы удалены, остальная часть была реабилитирована с использованием корректирующих действий в 90-х гг. При обследовании 20 тысяч домов, построенных с применением автоклавированного пенобетона, оказалось, что он использовался в минимальных частях зданий, а концентрация радона внутри помещения превышала уровень вмешательства (400 Бк/м<sup>3</sup>) только для 1–2 % реабилитируемых домов. При реабилитации третьего типа домов установлено, что коэффициент эманирования радона из использованного шлакобетона не превышает 1–5 %, потому концентрация радона внутри помещения не превышала 200–800 Бк/м<sup>3</sup>. В процессе реабилитации жители этих домов потребовали возмещения затрат. Положительное решение было принято правительством в 1991 г., однако только 4 % домовладельцев продали свои дома правительству, большинство согласилось провести реабилитационные мероприятия. Накопленный опыт реабилитационных мероприятий, проведенных в 1990–2000 г., позволил выявить наиболее эффективные методы корректирующих действий. Было установлено, что принудительная вентиляция помещений позволяет достичь эффективных результатов в отличие от использования различных барьерных материалов. Результаты этой деятельности были положены правительством в основу системы регулирования и контроля содержания радионуклидов в строительных материалах [53]. В частности, поставщики материалов обязаны ежегодно представлять результаты измерений в регулирующие органы, на основе которых в Государственном управлении ядерной безопасности создана национальная база данных по содержанию радиоактивного газа-радона в помещениях.

Накопленный к 2000 г. опыт в области радоновых обследований был положен в основу первого национального плана действий,

утвержденного постановлением Чешского Правительства в 1999 г. В настоящее время в Чехии реализуется уже второй национальный план действий, который рассчитан на период 2010–2019 гг. Этот план развивает достигнутые результаты на основе собственного опыта и современных рекомендаций ЕС, ВОЗ, МКРЗ и МАГАТЭ.

Реализация национального плана действий осуществляется на межведомственной основе с участием Государственного управления ядерной безопасности, Министерства окружающей среды, Министерства регионального развития, Министерства сельского хозяйства, Министерства промышленности и торговли, а также Министерства здравоохранения. Координатором работ является Государственное управление ядерной безопасности, которое оценивает выполнение отдельных задач, подготавливает регулярные доклады о выполнении пунктов программы. При этом отдельные департаменты непосредственно отвечают за выполнение возложенных задач, включая их финансирование [56]. Выполнение плана базируется на законодательно установленных нормативных актах (Закон об атомной энергии -Atomic Act, строительный закон -Building Code), принятых технических стандартах (Защита зданий от радона, поступающего из почвы – ČSN 73 0601 Protection of buildings against radon from the soil, Защита зданий от радона, поступающего из строительных материалов – ČSN 73 0602 Protection of buildings against radon from building), а также разработанных методах измерения радона и корректирующих действий [56].

Основные направления деятельности этого плана и возникающие проблемы можно охарактеризовать следующим образом. Обладая достаточно объективной информацией о содержании радона в жилищах в различных районах страны, основные усилия плана, в конечном итоге, направлены на эффективную и действенную реализацию корректирующих действий и превентивных мер при широком вовлечении населения и заинтересованных организаций и лиц. При выполнении плана предусматривается решение целого ряда принципиальных вопросов [53], среди которых одним из основных является – установление количественных значений референтных уровней. Законом 1997 г. для существующих зданий рекомендован предельный уровень 400 Бк/м<sup>3</sup>, для новых – 200 Бк/м<sup>3</sup> [56]. По мнению ВОЗ, оптимальным

референтным уровнем, обеспечивающим существенное снижение коллективной радон-индуцированной смертности от рака легкого, может быть значение 100 Бк/м<sup>3</sup> и ниже. Достижение таких уровней содержания радона в существующих зданиях в масштабах страны является трудноосуществимой задачей. Необходим поиск «лучших практик» радонозащитных мероприятий. Ответы на эти вопросы должны быть получены в научных исследованиях, организация которых в рамках принятого национального плана действий лежит в сфере ответственности правительства [53].

В рамках принятого национального плана действий предусмотрено дальнейшее проведение репрезентативных обследований и геологических прогнозов для создания карт радонового риска различного масштаба. Будут продолжены целевые обследования в радоноопасных районах. Особенностью Чехии в организации этих обследований является то, что в радоноопасных районах во всех муниципалитетах и примерно в 10 % домов в других муниципалитетах долговременные измерения проводятся бесплатно. В настоящее время обследовано 160 000 домов (из них 20 000 домов имеют уровень ОА радона в воздухе более 400 Бк/м<sup>3</sup>).

Результаты этой деятельности направлены на совершенствование адресных корректирующих действий (включая тестирование их эффективности), субсидирование которых осуществляет государство. В настоящее время частные дома и школы при содержании радона более 1000 Бк/м<sup>3</sup>, а также организации, эксплуатирующие источники водоснабжения с содержанием радона более 300 Бк/л, получают субсидию в размере 5 тыс. евро. В табл. 7.3 приведена информация об объемах реабилитационных мер и размерах субсидий [53].

*Таблица 7.3.*

**Объемы реабилитационных мер и размеры субсидий**

<b>Типы объектов</b>	<b>Количество мероприятий</b>	<b>Общая субсидия</b>
Частные дома	около 4000	40 млн евро
Школы	около 340	
Объекты водоснабжения	около 350	

При проведении корректирующих действий Правительство Чешской Республики учло ошибки, допущенные в ходе предыдущего плана, когда финансирование этих действий осуществлялось без эффективного контроля и при отсутствии должных навыков у строителей. 25 % корректирующих действий были недоброкачественными, а в отдельных случаях ситуация была хуже после их проведения, что вызывало недоверие населения к радоновым программам. В принятом плане предусматривается жесткий контроль выполнения корректирующих действий, в основу которого положен проверочный тест после их завершения. Вначале проводится краткосрочное измерение, выполняемое коммерческими компаниями, затем долгосрочное измерение продолжительностью в 1 год. Кроме того, разработана программа радонового «диагноза» дома для оценки реальных уровней, источников и путей поступления радона. В этих целях предложены новые технологии: вентилирующие двери (Blower Doors), измерение мощности вентиляции с помощью «газа-свидетеля», инфракрасный термограф, позволяющий установить путь поступления радона по разности температур воздуха в помещении. Рекомендованы технологии, основанные на одновременном измерении радона в различных частях дома, что позволяет учесть активность деятельности человека внутри помещения, режим вентиляции и поступления тепла. Проводится политика поддержки индивидуальной деятельности по развитию «радоновой индустрии», в рамках которой поощряются интегральные измерения радона (например, при продаже домов), внедрение процедуры радонового «диагноза», корректирующие действия.

Успех в осуществлении корректирующих действий во многом определяется осведомленностью населения о радоновой проблеме, поэтому стимулированию развития связей с общественностью в новом национальном плане действий отводится приоритетная роль. В этих целях ежегодно выпускается две публикации, которые распространяют среди всех департаментов, контролирующих строительство, и в радоноопасных районах всех муниципалитетов. Содержащаяся в них информация адресована как населению, так и заинтересованным лицам: проектировщикам, строителям и архитекторам, специалистам агентств по недвижимости и ипотечному кредитованию, врачам, пре-

подавателям в школах. Организован специальный веб-сайт радоновых программ: <http://www.radonovoprogram.cz/radonovoprogram>. Осуществляется ряд других мероприятий, которые во многом совпадают с аналогичной деятельностью в других странах Европы. Периодически проводятся социологические опросы, позволяющие оценить информированность населения о радоне, отношении к измерительным кампаниям, индивидуальной реакции на высокие концентрации радона и т.п. По результатам данных опросов отмечается [56], что уровень общедоступных знаний о радоне достаточно высок (80 % опрошенных знают о радоне), однако эти знания не являются мотивирующим стимулом для проведения радонозащитных мероприятий, 20 % населения вообще не интересуется радоном. Знание о том, что радон является причиной рака легкого, имеют 26 % врачей, при этом только 40 % пульмонологов и онкологов знают об этой связи [53]. Население не готово тратить деньги на защиту от радона, оно предпочитает бесплатные измерения и меры самопомощи. Ни население, ни профессионалы не заинтересованы в поиске информации о радоне.

Осуществление превентивных мер направлено на предотвращение превышения установленных законодательством (Atomic Act (18/1997), Decree 307/2002, Governmental Decision 583/1999) нормативов (200 Бк/м<sup>3</sup>) по содержанию радона в новых зданиях. При строительстве новых зданий организован обязательный радиационный контроль всех источников поступления радона внутрь помещения (грунт, стройматериалы, вода). Предусматривается обязательная оценка радонового индекса для каждой стройплощадки перед новым строительством и меры по радиационной защите нового здания в соответствии со строительным кодексом. Принципы проектирования и применения различных типов противорадоновой техники определены стандартами 1995, 2000, 2006 гг. (ČSN 73 0601 Protection of buildings against radon from the soil) [53,54,56]. С 1991 г. построено около 200 000 домов с использованием превентивных мер, однако примерно 2/3 требуют проведения защитных мероприятий (ежегодно около 12 000 зданий). Это объясняется отсутствием навыков (и, вероятно, необходимых знаний) у строительных профессионалов. В соответствии со стандартом 2005 г. развивается стратегия «Радоновая этикетка»

(Radon label). Она служит для сравнения измеренных концентраций внутри жилища с установленными пределами, а также обеспечивает информацией о радоновых рисках возникновения рака легкого [53].

В заключение обзора мероприятий, осуществляемых в Чешской Республике в рамках радоновой стратегии, следует отметить, что у руководителей стратегии имеется четкое представление о том, что достижение результатов по снижению концентрации радона внутри помещений и смертности рака легкого требует длительного периода времени. Решить эту задачу наилучшим образом домовладельцам поможет правильная информация, которая должна быть предоставлена им уже сейчас [53]. Эта задача, решаемая в рамках принятой радоновой стратегии, стоит на первом месте.

В приложении к настоящей главе приведено с небольшими сокращениями содержание принятого в Чехии национального плана действий, ознакомление с которым может быть полезным специалистам и лицам, принимающим решения, деятельность которых осуществляется в сфере радиационной защиты. Кроме того, это позволит не останавливаться детально при обзоре содержания национальных планов действия других стран, поскольку включенные в них мероприятия во многом идентичны тем, которые приняты в Чехии.

### **Швейцария**

Как и в большинстве стран Европы, первые исследования в Швейцарии начали проводиться в начале 1980-х гг., результаты которых были представлены в 1985 г. в докладе рабочей группы, в которой участвовали Федеральное управление общественного здравоохранения и Федеральное агентство по энергетике [60]. Исследования показали, что радон и продукты его распада ответственны за облучение значительной части (около 40 %) населения Швейцарии. Кроме того, в докладе было отмечено отсутствие в стране статистических данных о воздействии радона на население, регламентов для строительства новых зданий и уровней вмешательства для санации существующих зданий, а также недостатки в отношении техники для снижения концентрации радона.

В целях преодоления этих недостатков по инициативе Федерального Совета, была создана на период с 1987 по 1991 г. исследова-

тельская программа RAPROS [61, 62]. Основные данные, полученные в результате выполнения этой программы, представлены ниже:

- концентрация радона в 10 000 домов (1 %) превышает 1000 Бк/м<sup>3</sup>, в 30 000 домов (3 %) – 500 Бк/м<sup>3</sup>, в 100 000 домов (10 %) – 200 Бк/м<sup>3</sup>;
- первичным (основным) источником поступления радона в помещения являются почвы, на которых расположены здания, вторичным – водоснабжение и строительные материалы;
- наиболее эффективными корректирующими действиями по уменьшению уровня радона в домах в качестве первого шага является герметизация фундамента, в качестве второго – установка вентиляционной системы в погребе.

На основе результатов выполнения программы RAPROS и рекомендаций ВОЗ 1993 г. был принят национальный план действий на период 1994–2014 гг. [62, 63]. Федеральный Совет Швейцарии Постановлением о радиационной защите от 22 июня 1994 г. [64] установил предельные значения концентрации радона в жилых помещениях 1000 Бк/м<sup>3</sup>, на рабочих местах – 3000 Бк/м<sup>3</sup>. Референтное значение для новых и реконструируемых зданий – 400 Бк/м<sup>3</sup>.

Эти показатели стали основой для принятия Радоновой программы 1994–2014 г., стратегия которой опиралась на следующие три основных положения:

- стимулирование граждан к измерению концентрации радона в их жилищах;
- проведение обязательной реабилитации при объемной активности радона в воздухе жилых помещений выше 1000 Бк/м<sup>3</sup>;
- снижение уровней облучения населения Швейцарии радоном в 2 раза.

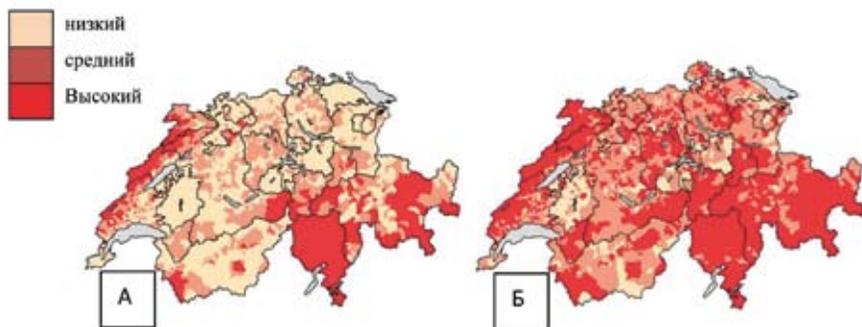
Эта программа последовательно выполнялась. Осуществлялись измерения радона в помещениях, особое внимание уделялось радоноопасным районам Швейцарии (Альпы и Юрская Дуга).

В период 1994–2012 гг. было выполнено 156 761 измерений с применением пассивных дозиметров, которые проводились в основ-

ном зимой [62]. Оценка средних значений уровня радона в жилищах в Швейцарии составила 77 Бк/м<sup>3</sup>, при этом число помещений с уровнями от 200 до 400 Бк/м<sup>3</sup> составило примерно 10 %, а с уровнями свыше 400 Бк/м<sup>3</sup> – около 7 % [10, 65–67].

По результатам измерений была создана радоновая карта Швейцарии, в соответствии с которой осуществлена классификация территории по зонам риска (низкая:  $OA Rn < 100$  Бк/м<sup>3</sup>, средняя:  $100 \text{ Бк/м}^3 \leq OA Rn < 200$  Бк/м<sup>3</sup> и высокая:  $OA Rn \geq 200$  Бк/м<sup>3</sup>). Выполнены пилотные исследования, по оценке эффективности различных методов реабилитационных мероприятий.

После выпуска ВОЗ новых рекомендаций [2], устанавливающих предельное значение для обязательной реабилитации в 300 Бк/м<sup>3</sup>, страна столкнулась с новыми вызовами в области обеспечения радонобезопасности. Оказалось, что вся территория Швейцарии (а не отдельные ее районы) попадает в зону риска. На рис. 7.8 показана карта изменений зон риска с учетом новых рекомендаций ВОЗ.



*Рис. 7.8. Карта зон риска Швейцарии, созданная на основе оценок радонового риска 1993 г. (а) и 2009 г. (б). (SFOPH ©, 2005.)*

Сложившаяся ситуация потребовала изменений в существующем плане действий, которые были внесены в отношении следующих семи основных задач [60]:

пересмотр правовых норм;  
расширение знаний об облучении радоном в жилищах;  
совершенствование новых мер защиты от радона в зданиях;  
согласование национальных программ по радону и энергосбережению;  
пересмотр программ подготовки строителей;  
повышение осведомленности общественности;  
разработка средств и методов реабилитации.

В связи с этим принятый план действий был разделен на две фазы: первая (с 2012 по 2014 г.) состояла в адаптации законодательства и проведении подготовительных действий, вторая (2014–2020 гг.) – в реализации мер, определенных в новом законодательстве.

Федеральное управление общественного здравоохранения (ФУОЗ), являясь координатором работ, должно было обеспечить эффективную поддержку внедрения нового плана в сотрудничестве с соответствующими партнерами и кантонами.

При анализе мероприятий по реализации пересмотренных семи задач следует отметить, что они во многом аналогичны тем, которые были подробно изложены в национальном плане действий Чешской Республики. Поэтому далее будут рассмотрены особенности этой деятельности, которые характерны для Швейцарии [60, 63].

Для пересмотра правовых норм, установленных Федеральным Советом Швейцарии в Постановлении о радиационной защите от 22 июня 1994 г., предусматривается переходный период (2012–2014 гг.). Новое законодательство должно было заменить стимулирующий подход обязательным, который должен был быть реализован, в первую очередь, органами, отвечающими за здравоохранение, строительство, планирование и окружающую среду в кантонах.

Расширение знаний об облучении населения радоном в жилищах было нацелено на получение достоверных оценок радон-обусловленных рисков, выполненных ранее на основании теоретических расчетов (см. рис. 7.8). В связи с предстоящим принятием

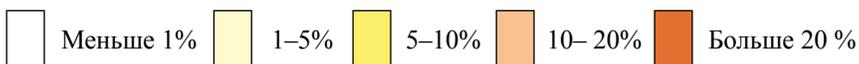
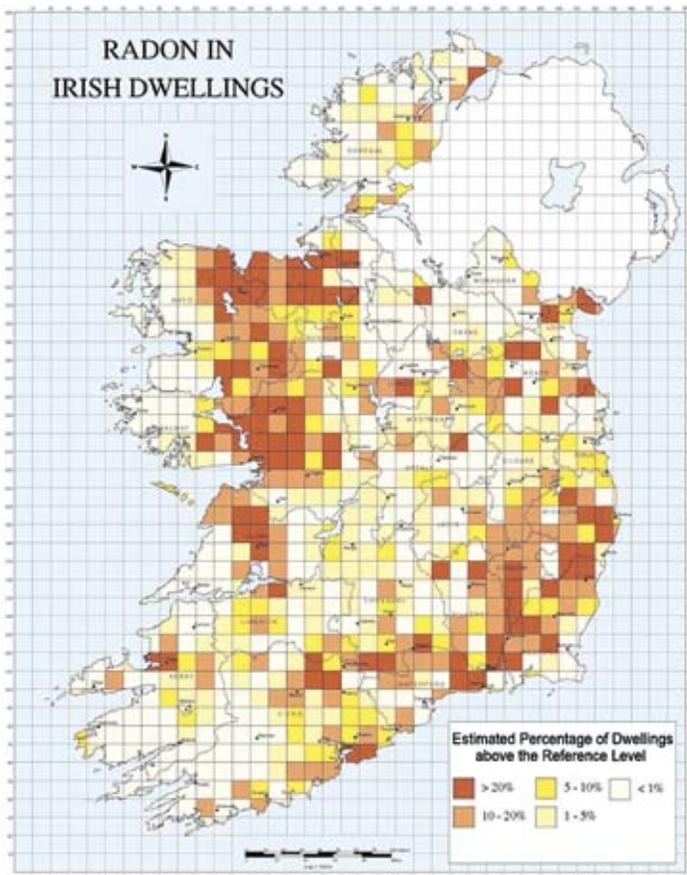
новых референтных уровней эта проблема приобрела национальные масштабы, так как коснулась практически всех регионов Швейцарии, а не только радоноопасных (Альпы и Юрская Дуга). Поэтому исследования распределения концентраций радона в жилых помещениях в стране должны были быть расширены и оптимизированы, а их количество увеличено в школах и дошкольных учреждениях, административных зданиях, предназначенных для длительного пребывания. На основе этих результатов должны быть получены представительные оценки среднего радонового риска для населения Швейцарии, создана система картирования риска как функции географического и архитектурного критериев.

Механизм реализации других мероприятий программы, таких как защита от радона в зданиях (разработка более строгих строительных норм и правил), корректирующие действия и превентивные меры (регламентируются стандартом Швейцарского общества инженеров и архитекторов SIA 180 «Защита тепловая, защита от влажности и климат внутри помещений») [68], подготовка различных специалистов, повышение осведомленности общественности [69] и ряд других, в основном, аналогичен используемому большинством европейских стран. Подробно с ними можно ознакомиться на веб-сайте [www.ch-radon.ch](http://www.ch-radon.ch).

### **Ирландия**

По результатам проведенного в 1990-х г. национального обследования оценка ежегодных средних значений уровня радона в жилищах в Ирландии составила 89 Бк/м<sup>3</sup>, при этом число помещений с уровнями от 200 до 400 Бк/м<sup>3</sup> составило примерно 6 %, а с уровнями свыше 400 Бк/м<sup>3</sup> – около 1,5 % [10, 70–72]. Прогноз, который был основан на измерениях в более чем 11 000 ирландских домов, показал, что около 7 % национального жилищного фонда характеризуются концентрациями радона выше референтного уровня в 200 Бк/м<sup>3</sup> [73].

По результатам обследований была опубликована карта радона в ирландских домах (рис. 7.9).



**Рис. 7.9.** Радон в жилищах Ирландии (прогнозируемое превышение референтного уровня – 200 Бк/м<sup>3</sup>) (РПИ © (2005).  
Web address: <http://www.rpii.ie/radon/maps/map.htm>)

Зона с повышенным содержанием радона определялась как область, в которой более чем в десяти процентах домов оцениваемые по прогнозам концентрации радона выше референтного уровня. Около 1/3 территории страны классифицируется как территория

с высоким риском. Оценка годового количества смертей от радон-индуцированного рака легкого в Ирландии оценена в количестве 150 – 200 случаев каждый год, что составляет примерно 13 % всех случаев смерти от рака легкого [72].

На сегодняшний день проведен достаточно обширный объем мероприятий по решению радоновой проблемы в Ирландии. В 1990 г. Правительством был установлен национальный референтный уровень для длительного воздействия радона в жилых домах в 200 Бк/м<sup>3</sup> [73], что соответствует установленным в других европейских странах уровням, а также учитывает рекомендации международных организаций, таких как ВОЗ и МКРЗ. Домовладельцам, у которых в помещениях превышен этот уровень, рекомендуется провести корректирующие действия.

В период между 1998 и 2004 г. в Ирландии была протестирована каждая школа на радон. Выявленные высокие уровни радона были устранены Департаментом образования и навыков (DES), который продолжает финансировать текущие измерения и последующие реабилитационные мероприятия, когда это требуется в школах [71, 73].

Большинство местных органов власти в районах с высокой концентрацией радона добились весьма значительных успехов в тестировании их социального жилищного фонда. На сегодняшний день почти в 20 000 домах, находящихся в ведении местных властей, были проведены измерения радона и, в случае необходимости, корректирующие действия [71, 73]

В ряде государственных органов приняты меры, направленные на снижение опасности от воздействия радона. Департамент по безопасности и гигиене труда (HSA) разработал программы и провел проверки на содержание радона на рабочих местах в районах с его высокой концентрацией. Начиная с 2009 г., HSA проводит инспекции более 1000 рабочих мест. В 2004 г. Государственное правовое управление рекомендовало работодателям начать измерения содержания радона в помещениях. К настоящему времени программы тестирования радона были реализованы на более чем 500 государственных рабочих местах. Те рабочие места, где были превышены уровни в 400 Бк/м<sup>3</sup>, уже реабилитированы [73].

Начиная с 2004 г., в радоноопасных районах были проведены кампании по повышению осведомленности общественности, мероприятия которых аналогичны используемым большинством европейских стран (встречи с общественностью, выступления по местному радио и в печати, рекламная деятельность и выпуск пресс-релизов). В результате этой работы отмечается достаточно высокий уровень информированности ирландской общественности о радоновой проблеме. В 2010 г. опрос населения показал, что 77 % респондентов слышали о радоновой газе и 43 % обеспокоены опасностью его воздействия. С 2003 г. ежегодно проводится национальный радоновый форум с участием представителей государственных органов, органов местного самоуправления, измерительных и реабилитационных компаний, национальных агентств, ответственных за строительные нормы, охрану здоровья и безопасность, ученых, а также экспертного сообщества и общественности [73].

Начиная с 1998 г., в строительные нормы и правила включены требования, предусматривающие проведение превентивных мер при строительстве новых зданий [73]. Исследования показали, что в среднем требование установить радоновый барьер в районах с высокой концентрацией радона привело к сокращению на 50% уровня концентрации радона в этих домах.

В Ирландии официально учреждены поставщики услуг по измерению содержания радона и проведению корректирующих действий. В настоящее время существуют 10 компаний по предоставлению услуг по измерению содержания радона и 28 компаний, предлагающих услуги по проведению корректирующих действий в общественных зданиях и на рабочих местах.

Важно отметить, что в Ирландии достигнуто согласие между соответствующими учреждениями, министерствами и ведомствами о существовании радоновой проблемы и ее масштабах, а также соглашение между политическими и административными системами о том, что проблема должна быть решена. Признавая эту проблему, Ирландский институт радиологической защиты и Управление здравоохранения опубликовали совместное заявление по радону в 2010 г., в котором призывают осуществлять скоординированные националь-

ные меры по снижению радоновой опасности в рамках национальной стратегии контроля над радоном [73].

Министерство окружающей среды в ноябре 2011 г. создало межведомственную группу по разработке национальной стратегии контроля над радоном. Предполагается, что эта стратегия определит рамки для скоординированного подхода к проблеме радона во всех государственных ведомствах и учреждениях. В течение 2012 г. межведомственная группа разработала проект национальной стратегии на основе широких консультаций с заинтересованными сторонами (представители здравоохранения, строительной индустрии, радоновых служб, научных кругов и правительства) и экономических оценок различных стратегий вмешательства для снижения радонового риска, разработанных органами здравоохранения. Оценку экономики здравоохранения проводил Ирландский институт радиологической защиты и Управление здравоохранения (Health Service Executive) при поддержке отдела экономики здравоохранения Оксфордского университета. Заключительным этапом этого процесса стали общественные консультации по данному проекту, направленные на получение обратной связи от всех заинтересованных сторон.

Реализация национальной стратегии контроля радона была начата в Ирландии с февраля 2014 г. [72, 73]. Ее основной целью (как и других представленных выше радоновых стратегий Норвегии, Чехии и Швейцарии) является снижение как коллективного риска воздействия газа радона для всего населения страны, так и индивидуального риска для людей, проживающих в районах с высокой концентрацией радона.

Стратегия устанавливает широкий спектр мер (48 рекомендаций), выполнение которых реализуется в рамках шести тематических направлений:

1. Превентивная стратегия при строительстве новых зданий.
2. Использование сделок с недвижимостью (продажа и аренда) в целях приведения в действие мер относительно радона.
3. Повышение осведомленности и поощрение индивидуальных действий.

4. Поддержка отдельных домохозяев и работодателей, достигших высоких результатов в снижении радоновой опасности.
5. Повышение уверенности в радоновых услугах.
6. Обращение с радоном на рабочих местах и в общественных зданиях.

Рекомендации по реализации тематических направлений в основном, совпадают с аналогичными рекомендациями радоновых стратегий Норвегии, Чехии и Швейцарии и других стран Европы. В качестве особенности национальной стратегии контроля радона в Ирландии следует отметить, что в ней очень детально изложены мероприятия по использованию сделок с недвижимостью (продажа и аренда) для выявления жилищ с высокими уровнями радона. Эти мероприятия представляется целесообразным рассмотреть более подробно.

Следует отметить, что использование операций с недвижимостью (продажа и аренда) имеет целью повышение эффективности и действенности мер по снижению радоновой опасности. В ходе проверки оказалось, что в около 5 % частных домов в Ирландии не обнаружен радон, значительное число домовладельцев проживают в домах с высоким уровнем радона, находясь в полном неведении о проблеме, существующей в их собственном жилище.

Одной из стратегий повышения информированности об уровнях радона является требование предоставления данных о его наличии при покупке-продаже домов. Следует отметить, что подобные меры применяют в Англии и Уэльсе уже более 10 лет, они положительно влияют на увеличение скорости тестирования и не приводят к каким-либо значительным задержкам процесса купли-продажи. Реализация этой стратегии должна сопровождаться комплексной просветительской программой, направленной на понимание этих мер в среде основных заинтересованных сторон (адвокатов, аукционистов, геодезистов, компаний по измерению содержания радона и т.д.).

Другая стратегия связана с арендой жилья. Учитывая, что по переписи 2011 г. около 24 % всего жилищного фонда в настоящее время сдается в аренду в частном порядке либо в рамках социальных жи-

лищных программ, очевидна необходимость взаимодействия с этим сектором.

Реализация первой стратегии (купля-продажа частного жилья) предполагает обязательную передачу продавцом информации об уровне радона в помещении покупателю (что ускорит темпы тестирования радона), разработку целевой информационной программы по повышению осведомленности заинтересованных лиц (частные адвокаты, агентства недвижимости, геодезисты и покупатели жилья), внесение дополнений в «Свод действующих норм и правил подрядчиков SEAI» в части обязательной проверки на наличие радона и включения ссылки на сайт Института по проблемам радиологической защиты Ирландии.

Реализация второй стратегии (аренда жилья) предполагает пересмотр Министерством окружающей среды, общин и местного самоуправления свода Положений о жилищных условиях (стандарты для арендованных домов) в части информации об уровне радона и темпах его тестирования. Советом по аренде частного жилья будет разработана программа консультаций с заинтересованными сторонами о проблеме радона в секторе аренды жилья, а также организовано целевое исследование и последующие опросы в целях контроля эффективности программы. В рамках данной стратегии необходимо продолжать реализацию программы тестирования и корректирующих действий в секторе социального жилья, эффективности использования местными властями механизма льгот, предусматриваемых домовладельцам частного жилья, которое оформлено местными властями в долгосрочную аренду для предоставления в качестве социального жилья в рамках программы размещения в арендованных домах.

Кроме того, работодателям и лицам, предоставляющим соответственно рабочие места и ответственным за коммерческие здания, должен быть направлен сборник инструкций о формулировке подходов к решению проблемы радона в договорах по строительству зданий для аренды, лизинга, а также в договорах страхования.

В заключение следует отметить, что, как и мероприятия при использовании сделок с недвижимостью, другие разделы национальной стратегии контроля радона в Ирландии характеризуются сочетанием

детального изложения мер и их адресности, а по своей направленности во многом аналогичны используемым большинством европейских стран.

### Франция<sup>1</sup>

Особенность управления риском, связанным с радоном во Франции, состоит том, что, являясь национальным приоритетом, эта проблема решается в многочисленных планах, направленных на охрану здоровья и окружающей среды.

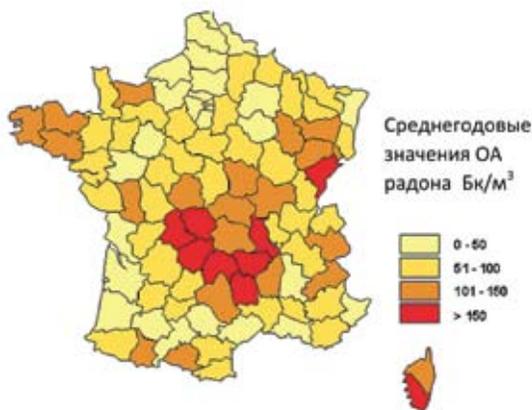
Облучение радоном населения Франции является основным источником воздействия ионизирующих излучений. По результатам проведенного в 1980 – 2003 гг. национального обследования оценка средних значений уровней радона в жилищах (взвешенных по плотности населения с учетом сезонности измерения и характеристик домов) во Франции составила 63 Бк/м<sup>3</sup>. При этом число помещений с уровнями от 200 до 400 Бк/м<sup>3</sup> равно примерно 6,5 %, а с уровнями свыше 400 Бк/м<sup>3</sup> – около 2 % [10, 74–77]. Среднегодовое значение объемной активности радона (в Бк/м<sup>3</sup>) для департаментов Франции представлено на рис. 7.10. Измерения почвенного газа-радона проведены только в отдельных регионах Франции [78, 79].

По оценкам Института санитарного надзора (InVS), во Франции от 1234 до 2913 случаев смерти от рака легкого обусловлено облучением радоном, что составляет от 5 до 12 % всех случаев смерти от рака легкого, наблюдаемых в стране [80]. Эти цифры приближаются к оценкам, сделанным в отношении других факторов риска. Так, в 1999 г. было определено, что от 2086 до 4172 смертных случаев от бронхиального рака относились к профессиональному воздействию асбеста [80].

Начиная с 2002 г., во Франции было внедрено нормирование, относящееся к управлению риском, связанным с радоном [80]. С 2004 г., в 31 подверженном воздействию радона департаменте страны введено обязательное измерение его объемной активности в больницах, школах, тюрьмах и т. п. Установлено 2 уровня действия. При

---

<sup>1</sup> Авторы выражают благодарность руководителю международного отдела ФМБА России Л.А. Карпиковой за научный перевод документов с французского языка.



**Рис. 7.10.** Среднегодовые значения концентраций радона (Бк/м<sup>3</sup>) для Франции. (IRSN (2005) ©[http://www.irsn.fr/vf/05\\_inf/05\\_inf\\_1dossiers/05\\_inf\\_16\\_radon/05\\_inf\\_16\\_2campagne\\_img2.shtm](http://www.irsn.fr/vf/05_inf/05_inf_1dossiers/05_inf_16_radon/05_inf_16_2campagne_img2.shtm)).

объемной активности радона 1000 Бк/м<sup>3</sup> и выше осуществляются незамедлительно корректирующие действия, при 400 Бк/м<sup>3</sup> осуществляют корректирующие действия в течение двух лет.

Законом № 2009-879 от 21 июля 2009 г. внесены дополнения в юридические нормы кодекса о здравоохранении, в соответствии с которыми вводится обязательное проведение измерений объемной активности радона в определенных категориях зданий, в том числе в жилых помещениях. В частности, было предусмотрено «уменьшить воздействие радона во всех образовательных учреждениях и во всех санитарных и социальных учреждениях до уровня ниже 400 Бк/м<sup>3</sup>».

Комплексный подход к управлению риском стал предметом деятельности первого Национального плана по охране здоровья и окружающей среды (2004–2008 гг.). Для реализации государственной политики в этой области Государственным управлением ядерной безопасности (ASN) в сотрудничестве с Дирекцией по жилищному строительству, градостроительству и ландшафтными работами (DHUP), Институтом радиологической защиты и ядерной безопасности (IRSN), Институтом санитарного надзора (InVS) и Научно-техническим

центром жилищно-гражданского строительства (CSTB) в 2005 году был разработан национальный план действий. Подробный доклад о выполнении 26 приоритетных действий этого плана, составленный Государственным управлением ядерной безопасности (ASN), опубликован в 2009 г. на сайте [www.asn.fr](http://www.asn.fr). С учетом результатов выполнения первого национального плана действий был принят второй национальный план действий на 2011–2015 гг. [80-82].

Данный план также является документом, разработанным Государственным управлением ядерной безопасности (ASN) на межведомственной основе в сотрудничестве с министерствами здравоохранения, строительства и труда, а также партнерскими государственными организациями (Институтом радиологической защиты и ядерной безопасности, Институтом санитарного надзора, Научно-техническим центром жилищно-гражданского строительства и Советом региона Лимузен).

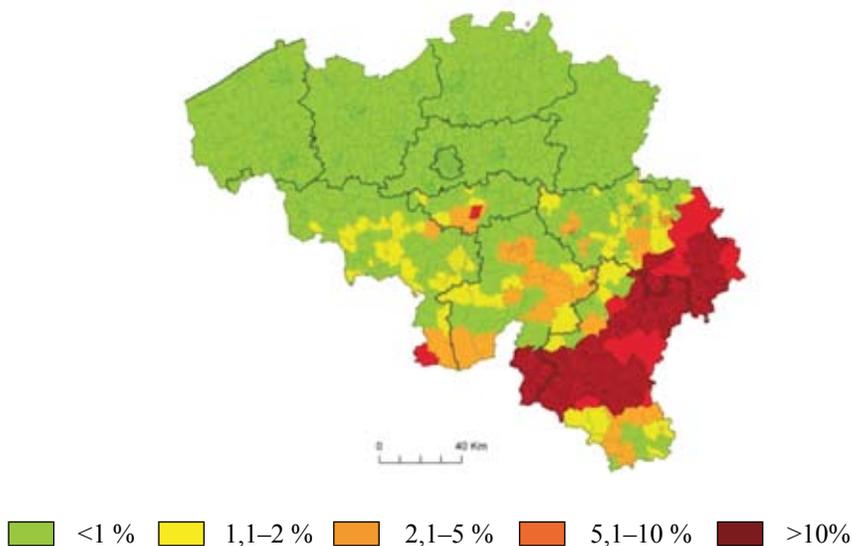
Приоритетными направлениями нового плана являются снижение облучения радоном в жилом секторе, применение новых правил строительства в новых зданиях, вовлечение и сотрудничество разных национальных и региональных субъектов, занимающихся этой проблемой. Большинство предусмотренных действий будет опираться на региональные инициативы.

В качестве примера, позволяющего сравнить содержание и оформление национальных планов действий Франции и Чехии, в приложении к настоящей главе с небольшими сокращениями приведено содержание принятого французского НПД, что может быть полезным специалистам и лицам, принимающим решения, деятельность которых осуществляется в сфере радиационной защиты.

### **Бельгия**

В Бельгии концентрация радона в помещениях значительно ниже, чем в рассмотренных ранее странах Скандинавии, Чехии, Австрии и др. По результатам проведенного в 1995–1999 гг. национального обследования, оценка средних значений уровня радона в жилищах составила 48 Бк/м<sup>3</sup>. При этом число помещений с уровнями от 200 до 400 Бк/м<sup>3</sup> равно примерно 1,7 %, а с уровнями свыше

400 Бк/м<sup>3</sup> – около 0,3%. Измерения радона в почвенном воздухе на национальном уровне не проводились [83–87]. На рис. 7.11 приведено изображение карты Бельгии, на которой разным цветом обозначены районы в зависимости от количества жилищ (в процентах), в которых превышен уровень действия, равный в 400 Бк/м<sup>3</sup>.



**Рис. 7.11.** Карта Бельгии с обозначением разным цветом районов в зависимости от количества жилищ (в процентах), в которых уровни радона превышали 400Бк/м<sup>3</sup>. (FANC© (2005).

Reference: <http://www.fanc.fgov.be/fr/radnat.htm#carteTH>

В табл. 7.4 приведены оценки среднегодовых концентраций радона в жилищах и распределение жилищ (в процентах) в зависимости от концентрации [88].

Таблица 7.4.

**Распределение жилищ Бельгии (в процентах) в зависимости от концентрации радона в помещениях**

Районы	Население (тыс. чел)	Число жилищ (тыс.)	АМ**	% > 100 Бк/м <sup>3</sup>	% > 200 Бк/м <sup>3</sup>	% > 300 Бк/м <sup>3</sup>	% > 400 Бк/м <sup>3</sup>	% > 800 Бк/м <sup>3</sup>
Бельгия	10 584 534	3742	57	10,0	2,1	0,9	0,6	0,2
Валлония	34 358 79	1325	84	26,0	4,5	2,6	1,6	0,4
Фландрия	6 117 440	2191	44	3,2	0,1	0,05	0,0	0,0
Брюссель	10 312 15	226	44	3,2	0,1	0,1	0,0	0,0
РОР*	376 568	130	220	43,0	33,0	17,0	13,0	4,3

\* радоноопасные районы,

\*\* среднегодовые концентрации радона в жилищах

В табл. 7.5 представлены показатели смертности от рака легкого для курящих и некурящих [88].

Таблица 7.5

**Показатели смертности населения от рака легкого для курящих и некурящих**

Регион	Показатели рака легкого (НК – некурящие, К – курящие)					Вследствие радона
	Риск для НК	Риск для К	К-во для НК	К-во для К	Общее к-во	
Бельгия	4,4	108,4	399	6558	6958	477 (27 НК и 450К) (7%)
Валлония	4,5	113,1	135	2221	2356	252 (14 НК и 238 К) (11%)
Фландрия	4,3	107,0	228	3740	3967	222 (13 НК и 209 К) (6%)
Брюссель	4,3	107,0	38	630	669	37 (2 НК и 35К) (6%)
РОР*	5,0	122,0	16	263	279	48 (НК и 45К) (17%)
Без радона**	4,1	101,0				

\* радоноопасные районы.

\*\* по данным Darby et al, 2005

В Бельгии координацию деятельности по выполнению национального плана действий осуществляет Федеральное агентство ядерного контроля (FANC). В основу действующего плана положены нормативы, установленные ЕС (90/143/Евроатом). Для ответственности были рекомендованы следующие уровни действия: 400 Бк/м<sup>3</sup> для существующих зданий и 200 Бк/м<sup>3</sup> для новых зданий. Для рабочих мест директива ЕС (96/29/ Евроатом) была реализована в Нормах радиационной защиты, в соответствии с которыми для облучения рабочих установлена соответствующая годовая доза 3 мЗв. Национальным планом предусматривается осуществлять деятельность по снижению радоновой опасности в рамках двух этапов: долгосрочного и краткосрочного [88]. Суть долгосрочного этапа состоит в реализации стратегии превентивных мер, которая предполагает проектирование новых зданий с требованиями по содержанию радона на уровне 100 Бк/м<sup>3</sup>, что в конечном итоге должно привести к существенному снижению заболеваемости раком легкого. Краткосрочный этап ориентирован на реализацию стратегии корректирующих действий для зданий с высокими уровнями радона. При этом планируется, что с принятием новых стандартов безопасности ЕС существующий уровень действия 400 Бк/м<sup>3</sup> (10 мЗв/год) будет снижен до 300 Бк/м<sup>3</sup> с последующей оптимизацией. Выполнение второй фазы достигается планомерным выявлением зданий с высоким уровнем радона и последующей реабилитацией, если в них превышен уровень действия.

Национальный план действий включает 5 областей деятельности:

1. Управление рисками (предусматривает формирование стратегии и целей, сотрудничество с местными органами власти и план коммуникаций);
2. Измерительные кампании (предусматривает в кооперации с местными партнерами тестирование радона в жилищах и на рабочих местах);
3. Регулирование (предусматривает процедуры и директивы относительно определения областей риска и интерактивно-

го отображения на карте, а также измерений радона в рабочих местах);

4. Осведомленность общественности (предусматривает освещение выполнения плана, брошюры, листовки, веб-сайт, радоновый день, обучающие курсы для строителей-профессионалов и т.п.);
5. Управление данными (предусматривает разработку базы данных по радону и картографирование).

Реализация краткосрочного этапа, направленного на реализацию корректирующих действий для зданий с высокими уровнями радона, построена на стимулировании этих действий путем проведения информационных сессий, учебных курсов для специалистов строителей, бесплатных измерений (после выполнения корректирующих действий), выборочного бесплатного тестирования.

Реализация долгосрочного этапа НПД, направленного на реализацию стратегии превентивных мер (которая предполагает проектирование новых зданий с требованиями по содержанию радона на уровне 100 Бк/м<sup>3</sup>), построена на проведении целого ряда мероприятий. Это переговоры с местными органами власти о включении профилактических мер в строительные нормы, обучение местных властей вопросам обеспечения новых застройщиков информацией о радоне, подробными радоновыми картами и информационными брошюрами, а также обучение архитекторов и профессиональных строителей.

При реализации радонового плана действий Федерального агентства ядерного контроля существует ряд дискуссионных вопросов, по которым нет согласованных решений. В первую очередь, это связано с принятием концепции референтных уровней, последующей оптимизации и отсутствием дозовых пределов, а также применением принципа оптимизации. До настоящего времени не удалось прийти к должному консенсусу в вопросе организации оптимальных мер радиационной защиты в отношении радона. Кроме того, большие трудности представляет дисперсия компетенций чиновников всех бюрократических уровней (федерального, регионального, местного) относительно всех аспектов радоновой проблемы [88].

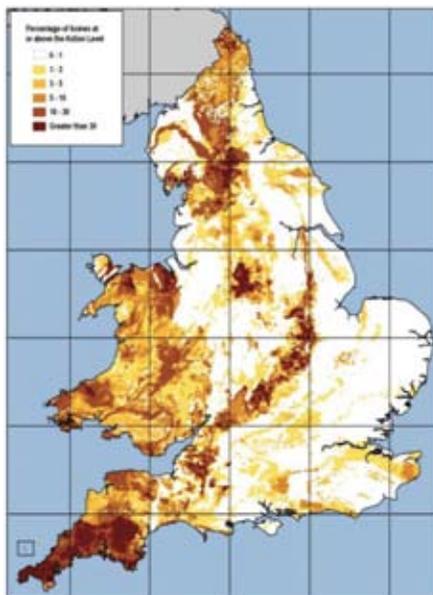
## Великобритания

Концентрации радона внутри помещений в Великобритании значительно ниже, чем в рассмотренных ранее странах Скандинавии, Чехии, Австрии, а также Бельгии. Среди проводимых в Великобритании мероприятий по снижению радоновой опасности определенный интерес представляет опыт кампаний по измерению радона в жилых помещениях, которому в данном обзоре будет уделено основное внимание.

По результатам региональных обследований в Англии, Уэльсе, Шотландии и Северной Ирландии, проведенных в 1980–2005 гг. оценка ежегодных средних значений объемной активности радона в британских жилищах составила 20 Бк/м<sup>3</sup>. При этом число помещений с уровнями от 200 до 400 Бк/м<sup>3</sup> примерно равно 0,4 %, а с уровнями свыше 400 Бк/м<sup>3</sup> – около 0,1 % [10, 89–96].

При оценке радоновой опасности в Великобритании также исходят из того, что уровни радона в здании достоверно прогнозировать невозможно. Можно предсказать вероятность высоких уровней, основываясь на логнормальном распределении в большей части диапазона концентраций. Для оценки радоновой опасности используют радоновый потенциал, который определяется как процент риска, превышающего уровень действия 200 Бк/м<sup>3</sup> [97]. В настоящее время Управление общественного здравоохранения Англии (PHE) совместно с Британской геологической службой (BGS) выпускает карты с указанием потенциальных уровней радона на местности. На рис. 7.12 представлена карта Англии и Уэльса (аналогичные карты имеются для Северной Ирландии и Шотландии), на которой указан процент домов, в которых превышен уровень ОА радона 200 Бк/м<sup>3</sup>. Построение карт осуществляется путем разделения территории на квадраты («элементарные ячейки») размером 1х1 км в соответствии с национальной сетью координат. В каждом квадрате определен процент домов, в которых концентрация радона превышает уровень действия 200 Бк/м<sup>3</sup>. На основании этих данных осуществляется градация, в соответствии с которой квадраты закрашиваются различными оттенками коричневого цвета (от светлого до темного). Всего выделено 5 градаций в зависимости от процента домов, в которых концентрация радона превышает

уровень действия  $200 \text{ Бк/м}^3$ : 1–3 %; 3–5 %; 5–10 %; 10–30 и более 30 %. Квадраты, в которых дома с концентрацией радона выше  $200 \text{ Бк/м}^3$ , составляют менее 1 %, считаются неподверженными воздействию радона, и окрашены в белый цвет. В случае недостаточности данных отнесение квадрата к той или иной градации проводится на основе экстраполяции с учетом имеющихся данных по соседним квадратам и информации о геологическом строении территории. Таким образом, получаются довольно детальные карты радоноопасности [95].



0–1    1–3    3–5    5–10    10–30    >30

**Рис. 7.12.** Процент домов в Англии и Уэльсе с превышением уровня действия  $200 \text{ Бк/м}^3$  (Miles© (2005)  
[http://www.hpa.org.uk/radiation/radon/radon\\_maps/uk\\_map.htm](http://www.hpa.org.uk/radiation/radon/radon_maps/uk_map.htm)

Меры по снижению радоновой опасности в Великобритании проводятся в рамках программы целевых внутренних обследований, которая включает ряд последовательных шагов [96]. Вначале определяются области с высокими уровнями, в которых затем находят ин-

индивидуальные дома с потенциально самой высокой концентрацией радона. Проводят в них измерение концентрации внутри помещения. При высоких уровнях проводят корректирующие действия, после чего для подтверждения их эффективности еще раз осуществляют измерения, которые, как правило, рекомендуется проводить повторно в долгосрочной перспективе.

Целевые обследования районов с высоким радоновым потенциалом в Великобритании проводятся в соответствии с официально установленными требованиями. Регламентируется объем выборки (5000–50 000 домов) и их количество, нуждающееся в корректирующих действиях (не менее 5 %). Необходимым условием является участие местных органов власти, наличие ресурсов у домовладельца для планирования и выполнения действий, а также финансирование для поддержки независимых измерений. Для проведения обследования индивидуальных домов сформирован так называемый «радоновый пакет». Он включает листовку с четкими инструкциями и справочной информацией, два пассивных детектора радона, используемых для измерения в течение трех месяцев, анкету с указанием характеристик дома и данных о жильцах (число, возраст, курильщики). Для надежности информации, получаемой по результатам обследования, на месте проводятся тренинги с персоналом органов местного самоуправления и специалистами (агенты по операциям с недвижимостью, арендодатели, строители, юристы, группы по борьбе с курением). Предусматривается привлечение средств массовой информации на ключевых этапах обследования. С владельцами осуществляются индивидуальные консультации, в ходе которых выдаются рекомендации о проведении корректирующих действий. Получила широкое развитие партнерская работа с районными советами, центральными и местными органами здравоохранения, строительными организациями и т. п.

Таким образом, снижение радоновой опасности в Великобритании осуществляется в рамках программ целевых обследований. При этом ключевая роль отводится развитию коммуникационных технологий, которые должны обеспечить активное вовлечение населения в процесс измерения радона в помещениях и при необходимости проведение корректирующих действий.

## Страны Северной Америки

### США

В Соединенных Штатах потенциальная опасность радона в жилищах стала известна широкой общественности в 1980-х гг. По оценкам Агентства по охране окружающей среды из общего числа 146 400 случаев смерти от рака легкого в 1995 г., 21 100 (14 %) были отнесены к воздействию радона внутри помещений. Проведенные в последующем эпидемиологические исследования подтвердили эту оценку. Смертность от радон-индуцированного рака легкого является второй ведущей причиной смерти для курящих и первой для некурящих людей ([www.epa.gov/radon](http://www.epa.gov/radon)).

Особенность мероприятий по снижению потенциальной опасности радона в США характеризуется разделением ответственности между федеральным уровнем и штатами. На федеральном уровне соответствующие министерства и ведомства обязаны издать необходимые руководящие принципы, руководства и инструкции, в которых до членов общества доводится информация об опасности радона, разработанных нормативных актах, а также мероприятиях, проведение которых позволит снизить риски для здоровья от его воздействия до определенных значений [97].

Так, под эгидой Агентства по охране окружающей среды на федеральном уровне создана карта радоновых зон (Map of Radon Zones). Карта охватывает всю территорию страны, опубликована в 1993 г. (см. рис. 7.13) и представлена в открытом доступе (<http://www.epa.gov>). В основу формирования зон положена оценка радонового потенциала для каждого из 3141 округов (графств) США. Радоновый потенциал оценивался на основании прогнозируемого среднего уровня радона внутри помещений и представляет собой среднее геометрическое значение его концентрации (в пикокюри на литр – пК/л) в воздухе помещений, расположенных в округе. При этом оценки радонового потенциала (РП) скорректированы с учетом структуры имеющихся фактических данных, неопределенностей результатов измерений, геологического строения территории, проницаемости грунтов, данных аэро-гамма-съемки, типа фундамента зданий. Особенность американской радоновой карты заключается в том, что границы геологиче-

ских провинций, составляющих основу карты, были адаптированы к границам графств. Это позволило представить всю территория страны на уровне графств и отнести их соответственно к зонам высокой (РП > 4 пКи/л (148 Бк/м<sup>3</sup>), красный цвет), средней (2 пКи/л (74 Бк/м<sup>3</sup>) < РП < 4 пКи/л (148 Бк/м<sup>3</sup>), оранжевый цвет) или низкой (РП < 2 пКи/л (74 Бк/м<sup>3</sup>), желтый) радоноопасности.

Цель этой карты состоит в том, чтобы помочь штатам оценить свои ресурсы в зависимости от значений радонового потенциала, принять соответствующие строительные коды и на их основе осуществить соответствующие корректирующие действия или превентивные меры, обеспечивающие радон-резистентность зданий.

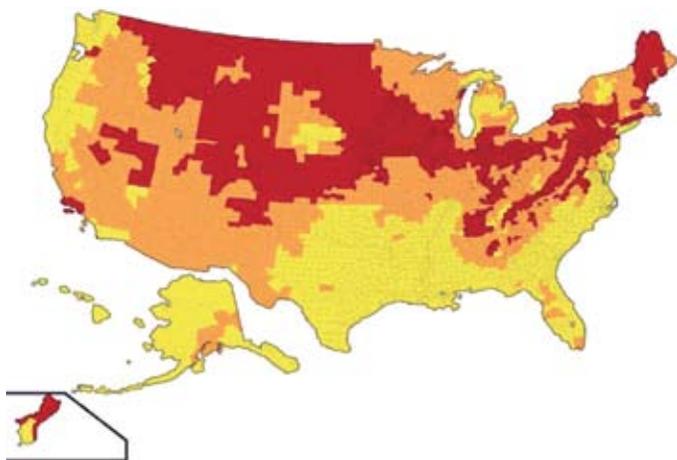


Рис. 7.13. Карта радонового потенциала США [<http://www.epa.gov>]

При рассмотрении законов и регулирующих правил, касающихся радона и являющихся сферой ответственности отдельных штатов, можно отметить, что их качество и тип от штата к штату значительно различаются. Отдельные штаты лицензируют или сертифицируют радоновые услуги, в том числе по тестированию радона, анализу детекторов по обнаружению радона, корректирующим действиям, консультациям и др. При этом, следует отметить, лицензирование и сертификация, осуществляемые на уровне штатов, пользуются большим доверием населения [98].

В США в соответствии с актом об информировании о радоне (Radon Awareness Act) принято указывать информацию об этом радиоактивном газе при проведении сделок с недвижимостью. Получили достаточно широкое распространение программы тестирования школ и детских садов ([www.crcpd.org/Radon.aspx](http://www.crcpd.org/Radon.aspx)) [97].

Измерение концентрации радона в жилище рекомендуется осуществлять самостоятельно, с помощью радонового теста, по принципу «сделай сам», то есть, предлагается приобрести наборы для проведения теста в радоновых лабораториях или розничных торговых точках. Может быть нанят квалифицированный специалист для проведения теста, особенно если измерение необходимо при осуществлении сделок с недвижимостью, для которых требуется независимый результат третьего лица. Аппаратура для тестирования радона и специалисты по проведению квалифицированных измерений должны быть утверждены Национальной ассоциацией по гигиене окружающей среды, Национальным советом по безопасности радона или радоновой программой штата. Ориентиром для проведения стандартных процедур и размещения дозиметров в зависимости от особенностей дома, а также для составления протокола является Руководство для граждан по радону Агентства по охране окружающей среды. Кроме того, более подробные рекомендации могут быть получены в департаментах охраны окружающей среды или здравоохранения штатов.

Аналогичные подходы приняты при проведении противорадоновых мероприятий в существующих и строящихся зданиях. При строительстве новых зданий в районах с радоновым потенциалом выше 4 пКи/л (устанавливается ЕРА или радоновыми программами штатов) рекомендуется применение радоновых барьеров. Информация о распределении повышенных концентраций радона в зданиях для определенных округов часто может быть получена из различных радоновых программ штата или в ЕРА. Рекомендован стандарт «Стандартная практика для вариантов контроля радона при проектировании и строительстве новых малоэтажных жилых домов», который следует применять при строительстве в графствах, имеющих высокий радоновый потенциал [97, 98]. Рекомендации по установке радоновых барьеров при новом строительстве обосновываются экономической эффек-

тивностью, поскольку стоимость этих работ составляет нескольких сотен долларов, в то время как расходы на корректирующие действия существующего дома зачастую превышают 1000 долларов.

Приведенная выше информация о предметной деятельности властей по снижению потенциальной опасности радона, наличие проверенной временем простой техники для тестирования и проведения противорадоновых мероприятий, накопленный более чем 10 летний опыт возведения конструкций домов с барьерами, препятствующими проникновению радона, не позволили США достичь желаемого прогресса. Жилищ с повышенным содержанием радона остается еще достаточно много, больше, чем когда-либо прежде. Большинство мало обеспеченных американцев не имеют финансовых источников для проведения противорадоновых мероприятий. Несмотря на широкое привлечение общественных организаций, многие американцы до сих пор не убеждены в необходимости рекомендуемых мер по снижению радонового риска и предотвращению многих случаев радон-индуцированных раков легкого [97, 98].

Оценивая сложившуюся в США ситуацию, в ноябре 2010 г. был проведен федеральный радоновый саммит, на котором была достигнута договоренность о разработке Федерального плана действий по радону. В 2011 г. представители многих министерств и ведомств начали изучение стратегий, которые должны были оказать существенное и длительное влияние на снижение радонового риска в жилищах. В конечном итоге представители девяти министерств и ведомств (Министерство сельского хозяйства, Министерство обороны, Министерство энергетики, Агентство по охране окружающей среды, Министерство здравоохранения и социального обеспечения, Министерство внутренних дел, Министерство жилья и градостроительства, Администрация основных служб, Министерство по делам ветеранов) впервые подготовили комплексные межведомственные предложения, которые были положены в основу Федерального радонового плана действий ([www.epa.gov/radon/action\\_plan.html](http://www.epa.gov/radon/action_plan.html)) [97, 98]. Совместно было подготовлено 33 мероприятия федерального уровня по снижению радонового потенциала, которые предусматривали необходимые ресурсы и учитывали преимущества совместного сотрудничества, позволяющего

увеличить влияние на динамику достижений при решении проблемы. Представители Агентства по охране окружающей среды, Министерства жилья и градостроительства представили Федеральный радоновый план действий на конференции «Здоровый дом» в 2011 г. В 2012 г. были обсуждены результаты годовой деятельности по выполнению плана, которые с этого времени ежегодно представляются ответственными представителями Агентства по охране окружающей среды, Министерства здравоохранения и социальных служб, Министерства жилья и градостроительства. В 2013 г. был выпущен первый отчет о достигнутых результатах, в котором отмечается, что из 33 запланированных министерствами и ведомствами мероприятий 19 выполнены полностью, 12 находятся в стадии выполнения, а по двум прогресс отсутствует.

Следует отметить, что федеральный радоновый план действий реализуется в рамках концепции «Здоровый дом» [98] в части, направленной на улучшение качества воздуха в помещениях. При этом деятельность министерств и ведомств федерального уровня, необходимая для ускорения действий в отношении снижения радонового риска, рассматривается как ключевая проблема концепции «Здорового дома».

Рамки Федерального плана предусматривают развитие трех главных направлений:

1. Продемонстрировать важность снижения радонового риска;
2. Обеспечить стимулы для тестирования радона и проведения корректирующих действий по снижению его уровня в жилищах;
3. Создать спрос на проведение тестирования радона и корректирующих действий;

В настоящее время проведен ряд мероприятий по выполнению программы.

В целях создания спроса на проведение тестирования радона и корректирующих действий Министерство жилья и градостроительства издало новые требования по тестированию радона и проведению корректирующих действий для программ страхования многоквартир-

ного ипотечного жилья. Агентство по охране окружающей среды инвестирует в создание четырех новых стандартов для практики. Новый временный стандарт корректирующих действий от воздействия радона в многоквартирных домах выпущен в 2014 г.

В целях стимулирования тестирования и проведения корректирующих действий Министерство сельского хозяйства США выпустило многоуровневое руководство для всех подведомственных периферийных офисов жилищного строительства, а также общественные информационные программы содействия уменьшению последствий воздействия радона при новом строительстве.

Для демонстрации важности тестирования радона и проведения смягчающих мероприятий Министерство здравоохранения и социальных служб [98] сообщило, что 27 центров по контролю болезней (CDC) включили радон в пятилетние противораковые планы, финансируемые в настоящее время штатами, что составляет 41 % от всех существующих противораковых планов. При этом радон впервые включен в деятельность по двум противораковым программам, а еще по двум расширена сфера их деятельности.

Программа дальнейшего развития Федерального радонового плана направлена на устранение предотвратимых рисков от радона. Для достижения этой цели предлагается осуществить меры по дальнейшему совершенствованию руководства стратегией, оптимизации в выборе приоритетных рычагов воздействия и повышения прозрачности проводимых мероприятий. Предполагается, что в результате ее выполнения будет реабилитировано 10 миллионов домов и вследствие этого сохранено 6,5 тысячи жизней [98].

В настоящее время реализована первая фаза данной программы, в рамках которой проведены мероприятия по демонстрации важности и значимости снижения радоновых рисков, адресности финансовых и стимулирующих мер, по созданию спроса в промышленности, осуществляющей деятельность по решению радоновой проблемы. Реализованные в рамках первой фазы меры были направлены на семейную аудиторию. Вторая фаза предусматривает мероприятия по повышению национальной осведомленности, расширению институциональных приоритетов и увеличению добровольных действий. В основу ее

осуществления будет положено тесное взаимодействие федеральных органов власти с широкими слоями заинтересованных неправительственных организаций, являющихся союзниками в решении радоновой проблемы [98].

Начало перехода к реализации второй фазы программы было положено на встрече представителей федерального и нефедерального руководств, организованной Агентством по охране окружающей среды и Американской ассоциацией пульмонологов (ALA), на которой обсуждались пути продвижения вперед, в том числе в плане повышения национальной осведомленности. В развитие решений данного совещания Американской ассоциацией пульмонологов был организован митинг «Союзники прорывных событий в сфере радона» и проведен ряд встреч.

В результате был сформирован Инициативный комитет руководства, в который вошли представители федерального уровня (Агентство по охране окружающей среды, Министерство здравоохранения и социальных служб, Министерство жилья и градостроительства) и заинтересованных неформальных и неправительственных организаций (ALA – Американская ассоциация пульмонологов, AARST – Американская ассоциация ученых и технологов в области радона, ASHI – Американское общество инспекторов домов, CanSAR – Пережившие рак против радона, CRCPD – Дирекция конференции по контролю радоновых программ, ELI – Институт экологического права, NCHH – Национальный центр «Здоровый дом»). Было достигнуто соглашение о развитии трех новых стратегий для решения вопросов в сфере управления рисками, кодексов и целенаправленной программы помощи (здравоохранение, помощь детям, профессионалы). Эта деятельность должна строиться на основе расширения институциональных приоритетов (ассимиляции с существующим порядком вещей) как ключевого влиятельного рычага в продвижении результатов. При этом приоритетность действий будет определяться организованной совместной рабочей группой.

Деятельность по выполнению второй фазы Федерального плана действий по радону под эгидой Инициативного комитета строится на основе двухэтапного подхода. На первом этапе объявляются пред-

лагаемые в национальном масштабе действия, а также планы, осуществимость которых затем обсуждается на национальном собрании. По результатам этой работы издается обновленный онлайн-доклад с описанием итогов. Второй этап связан с официальным запуском национальных усилий по выполнению мероприятий в партнерстве федеральных органов власти с неформальными и неправительственными организациями [97, 98]. При этом Агентство по охране окружающей среды сохраняет ведущую роль в продвижении стратегии работ, написании национального плана и публикации результатов. Американская ассоциация пульмонологов проводит рабочие встречи по обсуждению актуальных вопросов предлагаемой стратегии, привлекая для этого созданную совместную группу и новых партнеров. При этом организации нефедерального уровня сосредотачивают свои усилия на реализации приоритетных направлений стратегии, осуществлении воздействия на рынок, а также системе отслеживания прогресса. Определение приоритетных действий основано на системном подходе, предусматривающем опору на национальные кадры в сфере радона, а также принятие решений на основе консенсуса при оценке потенциальных достижений, уровня усилий, измеримости результатов. На основании данного системного подхода формируется приоритетный список стратегий и разрабатывается график выполнения. В качестве примера приоритетов Федерального плана действий по радону, можно привести перечень отдельных новых стратегий, предложенных для будущей реализации. Это деятельность Министерства жилья и градостроительства по совершенствованию требований к жилищам и Агентства по охране окружающей среды в сфере нормотворчества, а также развитие благотворительности, оптимизация условий предоставления налоговых кредитов для тестирования радона и проведения реабилитационных действий и т. п.

Таким образом, в США перспективы развития Федерального плана действий по радону связывают с предоставлением населению доступных услуг при проведении мероприятий по снижению радоновых рисков, совершенствованием нормативной базы по всем аспектам этой проблемы, оптимизацией сфер ответственности между федеральными органами власти и властями штатов. Эти действия по-

строены на широком привлечении общественности и тесном взаимодействии федеральных органов власти с неправительственными организациями на всех этапах реализации плана.

### **Канада**

В основу развития радоновой стратегии и национального план действий Канады положены результаты объединенных эпидемиологических исследований по оценке риска развития рака легкого, обновленные рекомендации ВОЗ (Руководство по радону в жилищах) и МКРЗ (публикации 115 и 126), а также руководство МАГАТЭ «Защита населения от облучения радоном и другими природными источниками излучения в помещении» [2–5].

В 2007 г. в Канаде было принято руководство, в котором для радона установлено значение референтного уровня для жилых зданий и других сооружений с высоким коэффициентом занятости для населения, а также для рабочих мест  $200 \text{ Бк/м}^3$ . Для реализации практических мероприятий, проведение которых было необходимо в связи с принятием референтного уровня в  $200 \text{ Бк/м}^3$ , была определена радоновая стратегия, в рамках которой уточнены полномочия федеральных органов власти и органов власти провинций и территорий [99].

В частности, Канадская комиссия по ядерной безопасности в соответствии с возложенными на нее полномочиями должна была провести оценку радоновых рисков работников атомной промышленности (то есть урановых рудников и горно-обогатительных комбинатов).

Канадские провинции и территории должны были обеспечить радоновую безопасность рабочих NORM-индустрии и выполнение на региональном уровне мероприятий в области общественного здравоохранения, а также других приоритетных направлений деятельности.

На Министерство здравоохранения Канады была возложена реализация Национальной радоновой программы в области защиты населения от воздействия радона в жилищах.

Таким образом, принятая радоновая стратегия четко разграничивала полномочия по ее реализации между Комиссией по ядерной

безопасности, провинциями и территориями и Министерством здравоохранения.

Канадская комиссия по ядерной безопасности должна была внести изменения в существующие Правила радиационной защиты для урановых рудников и горно-обогатительных комбинатов. Действующими Правилами были установлены однозначные требования к продуктам распада радона, выраженные в рабочих уровнях – РУ или в рабочих уровнях в месяц – РУМ. В соответствии с принятой стратегией предполагается удалить прямые ссылки на радон, дочерние продукты его распада, рабочий уровень, рабочий уровень в месяц. Текущий расчет дозы дочерних продуктов распада радона будет пересмотрен в соответствии с предлагаемыми новыми рекомендациями МКРЗ [4]. В этих целях предусмотрены отдельные консультации по новым дозовым коэффициентам и выполнение ряда научных проектов. В частности, Комиссией по ядерной безопасности будут профинансированы исследования по оценке доз облучения от дочерних продуктов распада радона, а также по применимости дозиметрического подхода для регулирования облучения работников радоном для канадских урановых рудников [99].

Провинции и территории должны осуществлять регулирование радоновой безопасности рабочих NORM-индустрии в соответствии с принятым в 2013 г. Руководством по управлению NORM. В его основу положен принцип «те же стандарты радиационной защиты, что и для видов деятельности, регулируемых Комиссией по ядерной безопасности».

Минздрав Канады в сотрудничестве с федеральными, провинциальными и территориальными Комитетами по радиационной защите разработали национальную программу действий, которая была принята в 2007 г. [99]. Ее основная цель состояла в поддержке реализации руководства 2007 г., установившего значение референтного уровня 200 Бк/м<sup>3</sup> для жилых зданий и других сооружений с высоким коэффициентом занятости для населения, а также для рабочих мест.

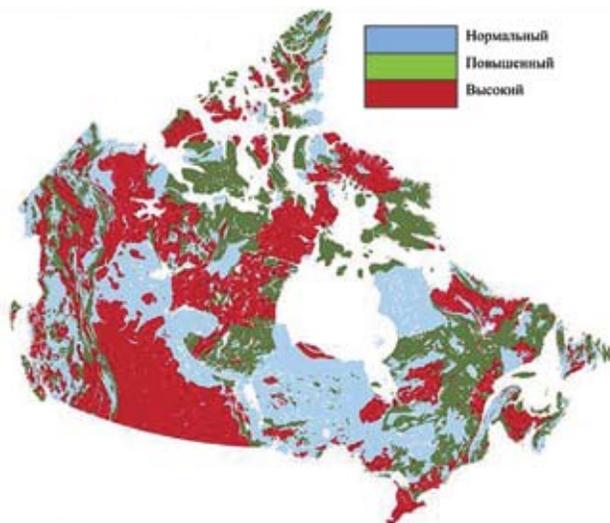
Национальная радоновая программа содержит пять компонентов:

1. Создание национальной радоновой лаборатории.
2. Проекты по тестированию радона.

3. Разработка и ведение базы данных радона и отображение на карте потенциальных областей радона.
4. Исследования в области радона.
5. Разработка и внедрение стратегии образования и повышения осведомленности общественности о радоне.

Ниже приведена обзорная информация о реализации Национальной радоновой программы.

Организована Национальная радоновая лаборатория, основная функция которой состоит в тестировании радона и анализе результатов в интересах Минздрава Канады, а также проведение технических консультаций для провинций, территорий и населения. Деятельность лаборатории характеризуется следующими результатами. Было выпущено два технических руководства (для жилых и общественных зданий), руководство по смягчению действия радона, рекомендации по пересмотру Строительного кодекса Канады, подготовлена программа сертификации специалистов и лабораторий для измерений и смягчения действия радона. Было проведено несколько крупных обследований, включая обследование жилья (примерно 14 000 домов) и более 15 000 федеральных зданий (рис.7.14).



*Рис. 7.14. Радоновая карта Канады (<http://assets.change.org>).*

По результатам этих обследований для всех провинций и территорий установлен процент домов, превышающих референтный уровень в 200 Бк/м<sup>3</sup> [99]. Количество домов с уровнем от 200 до 600 Бк/м<sup>3</sup> для трех провинций составляет от 15 до 20 %, для остальных не превышает 10 %, а с уровнем свыше 600 Бк/м<sup>3</sup> для 4 провинций составляет от 2,5% до 6,1 %, для остальных не превышает до 1,3 %.

В рамках национальной программы действий издано два национальных стандарта Канады: «Параметры управления радоном для нового строительства в малоэтажных жилых домах» и «Варианты корректирующих действий для существующих малоэтажных жилых домов».

В апреле 2012 г. была запущена Канадская национальная квалификационная радоновая программа, в результате которой выдано 155 сертификатов на измерения, 77 сертификатов по корректирующим действиям, проведена сертификация 11 аналитических лабораторий [99].

Был выполнен ряд научных проектов. В частности, изучена в полевых условиях эффективность различных противорадиновых барьеров при осуществлении превентивных мер, созданы базы данных по методам корректирующих действий в существующих зданиях, уточнены оценки риска рака легкого. Проведены сравнительные оценки последствий корректирующих действий в домах с уровнем радона выше 200 Бк/м<sup>3</sup>.

С начала принятия национального плана действий в Канаде проводится в жизнь обширная программа образования и информирования широкой общественности. Ежегодно проводится «месяц радоновых действий», организована кампания по пропаганде здорового образа жизни с профессиональным врачом, подготовлен аккредитованный online курс непрерывного образования по радону для специалистов в области здравоохранения. Для канадских домовладельцев выпущено руководство по сокращению радона, осуществляется социально-ориентированная программа «Радон через почту» и целевая программа охвата групп риска среди населения (курильщики, молодые семьи, жители регионов с высоким уровнем радона). Для врачей офисов подготовлен и разослан информационный листок

«Распространение радона: Другая причина бросить». Ежегодно организовано проведение отдельных конференций, около ста различных тематических мероприятий. налажен выпуск и распространение (до 1 млн. в 2014 г.) брошюр, рассматриваются запросы граждан (до 800 в 2014 г.), организована горячая линия для консультаций с врачом. В этой деятельности основное внимание уделяется провинциям, территориям и муниципалитетам, а также широкому кругу специалистов первичного звена органов здравоохранения, строительной индустрии, сферы недвижимости.

Таким образом, в Канаде национальный план действий по радону, координируемый Министерством здравоохранения, предусматривает на федеральном уровне совершенствование нормативной базы, проведение измерительных кампаний на территории страны, предоставление населению услуг для осуществления мероприятий по снижению радоновых рисков, а также развитие системы широкого информирования общественности о радоновой опасности и внедрение различных образовательных программ. Эти действия построены на тесном взаимодействии с органами власти провинций и территорий, а федеральные, провинциальные и территориальные программы и руководства - согласованы с рекомендациями ВОЗ и МАГАТЭ.

## **7.2. Отечественная практика регулирования**

### **7.2.1. Подходы к регулированию облучения населения радоном**

Несмотря на то, что дата образования Российской Федерации в ее современном виде известна точно, четкое разделение истории развития нормативно-правового обеспечения радиационной безопасности населения при облучении природными источниками излучения на советский и постсоветский периоды невозможно. Прежде всего, это связано с тем, что фундаментальные преобразования в социально-экономической сфере не сопровождались такими же глубокими преобразованиями в радиационной гигиене и радиационной безопасности населения. При образовании Российской Федерации во многом удалось сохранить преемственность в развитии существовавшей в

СССР нормативно-правовой базы нормирования радиационной безопасности.

Регулирование облучения населения радоном осуществлялось в рамках системы нормирования радиационной безопасности населения при воздействии природных источников ионизирующего излучения, которая в ее современном виде выстроена на базе существовавшей в СССР. Поэтому правильнее будет говорить о двух периодах в развитии этой системы: до 2000 г., когда в Российской Федерации в целом была создана законодательная база регулирования, определившая радоновую стратегию страны, приняты НРБ-99 и ОСПОРБ-99, и после этого.

История исследований природных источников ионизирующего излучения с целью оценки их воздействия на население в нашей стране насчитывает почти 50 лет. Она начиналась с масштабного исследования содержания естественных радионуклидов в природном строительном сырье практически всех основных месторождений СССР [100] и завершилась разработкой первых нормативов [100, 101] и ряда инструктивно-методических документов [102, 103]. Позднее были разработаны первые приборы для контроля объемной активности (ОА) радона и эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) изотопов радона в воздухе помещений [104].

В этот же период в стране начались первые исследования уровней облучения населения природными источниками излучения в коммунальных и производственных условиях [105,106]. И уже в 1991 г. был принят первый нормативный документ «Временные критерии ...» [107], призванный ограничить облучение населения основными природными источниками излучения – внешним гамма-излучением природных радионуклидов в среде обитания, природными радионуклидами, содержащимися в строительном сырье и материалах, а также изотопами радона в воздухе помещений.

Первые уровни вмешательства по ОА радона в воздухе помещений были приведены в Публикации 39 МКРЗ 1984 г. [108], после чего в большинстве развитых стран стали приниматься свои национальные нормативы по данному фактору [109]. После принятия в нашей стране в 1991 г. Временных критериев вышла

Публикация 65 МКРЗ [110], в которой были даны рекомендации по ограничению содержания изотопов радона в воздухе жилых домов и производственных зданий. Появление Публикации 65 МКРЗ, целиком посвященной проблемам регулирования ограничения облучения населения за счет радона в воздухе помещений зданий, по-видимому, следует считать официальным признанием ведущей роли природных источников ионизирующего излучения в облучении населения.

Интересно отметить, что нормативы по ЭРОА изотопов радона в воздухе жилых и общественных зданий, принятые во Временных критериях [107], в последующем вошли в НРБ-96 [111] практически без изменений. Однако при подготовке НРБ-99 и НРБ-99/2009 [112, 113] исчезло одно из наиболее важных требований к содержанию изотопов радона в воздухе помещений, которое содержалось в первых документах [107, 111]. Уровень ЭРОА изотопов радона  $400 \text{ Бк/м}^3$  во Временных критериях и НРБ-96 рассматривался как предельный, при превышении которого должен был рассматриваться вопрос о переселении жильцов и перепрофилировании зданий или части помещений. В НРБ-99 и НРБ-99/2009 это требование стало более мягким и фактически сформулировано как рекомендация. Заметим также, что во всех четырех нормативных документах наименее удачной дана формулировка требования к нормативу по ЭРОА изотопов радона в воздухе проектируемых и строящихся зданий. На практике такая формулировка приводит к тому, что это требование применимо именно к зданиям на стадии их проектирования и строительства (см. п. 5.3.2 НРБ-99/2009). А требование к вновь построенным зданиям фактически оказывается таким же, как к существующим эксплуатируемым зданиям (см. п. 5.3.3 НРБ-99/2009).

Отметим, что принятые 25 лет назад в нашей стране нормативы по содержанию изотопов радона в воздухе помещений оказались наиболее близкими к последним рекомендациям в Публикации 103 МКРЗ как по величине данного фактора, так и по идеологии их применения на практике [114], что наглядно представлено в табл. 7.6.

Таблица 7.6.

**Соотношение допустимых уровней ОА радона в воздухе помещений в Российской Федерации с рекомендациями международных авторитетных организаций**

Международные организации	Нормативы		Российская Федерация	Нормативы *	
	Жилые помещения	Рабочие места		Жилые помещения	Рабочие места
МКРЗ 65 (1993)	600	1500	КПР (1991)	200 / 400 **	–
ВОЗ (2009)	100	–	НРБ-96 (1996)	200 / 400 **	620 ***
МКРЗ 126 (2014)	300	300	НРБ-99 (1999)	200 / 400 **	620 ***
МАГАТЭ (2014)	300	1000	НРБ-99/2009 (2009)	200 / 400 **	620 ***
ЕВРОАТОМ (2014)	300	300	ОСПОРБ-99/2010	200 / 400 **	300/600 ****

Примечания к табл. 7.6.

\* В России нормирование ведется по среднегодовому значению ЭРОА изотопов радона в воздухе:  $\text{ЭРОА}_{\text{Rn}} + 4,6 \cdot \text{ЭРОА}_{\text{Tn}}$ . При пересчете ЭРОА радона в ОА радона в воздухе в табл. 7.6 значение коэффициента радиоактивного равновесия между радоном и ДПР принято равным 0,5.

\*\* В числителе приведен норматив для проектируемых жилых и общественных зданий, в знаменателе – для эксплуатируемых зданий.

\*\* Нормируемой величиной является годовая эффективная доза облучения работников природными источниками излучения в производственных условиях. Нормативы по ОА (ЭРОА) для производственных зданий не установлены. ЭРОА изотопов радона в воздухе на уровне  $310 \text{ Бк/м}^3$  соответствует эффективной дозе  $5 \text{ мЗв/год}$  при монофакторном воздействии, времени работы в течение г. 2000 час и интенсивности дыхания  $1,2 \text{ м}^3/\text{час}$ .

\*\*\*\* В числителе приведен норматив для проектируемых производственных зданий и сооружений, в знаменателе – для эксплуатируемых зданий.

С признанием ведущей роли изотопов радона в формировании облучения населения начались интенсивные разработки аппаратурного и методического обеспечения измерений [104], постепенно накапливались данные о содержании изотопов радона в зданиях на территории отдельных субъектов РФ. Однако в большинстве случаев эти данные были достаточно разрозненными, их получение часто базировалось на энтузиазме отдельных специалистов. Качество и достоверность результатов измерений вызывали сомнения из-за отсутствия стандартизованных средств измерений, недостаточного метрологического обеспечения, а также в связи с ошибками в формировании выборок для оценки уровней облучения радоном отдельных групп населения.

Со временем стало очевидным, что решение радоновой проблемы как на территории отдельных субъектов Российской Федерации, так и в целом по стране возможно только в рамках национальной целевой программы. К этому времени во многих зарубежных странах разворачивались обширные национальные программы исследования по оценке уровней облучения населения за счет радона в воздухе помещений, содержания природных радионуклидов в источниках питьевого водоснабжения, эпидемиологические исследования по оценке последствий облучения населения радоном в жилых домах и на различных производствах [115–118, см. раздел 7.1.].

В нашей стране аналогичная программа была разработана и принята в 1994 г. Постановлением Правительства Российской Федерации № 809 от 06.07.1994 г. Федеральная целевая программа снижения уровней облучения населения Российской Федерации за счет природных источников ионизирующего излучения (ФЦП «Радон»). В отличие от большинства национальных программ в зарубежных странах ФЦП «Радон» с самого начала формировалась как комплексная программа. В рамках этой программы предусматривались мероприятия по различным направлениям ее правового и научно-методического сопровождения и практической реализации.

В числе основных направлений ФЦП «Радон» достаточно назвать следующие: аппаратурно-методическое и метрологическое обеспечение радиационного контроля, разработка инженерно-

строительных мероприятий по снижению содержания изотопов радона в воздухе зданий, адресные программы радиологических обследований на территориях с повышенной потенциальной радоноопасностью, эпидемиологические исследования, мероприятия по снижению неблагоприятных медицинских последствий облучения населения и др.

Постановлением Правительства РФ № 809 от 06.07.1994 г. было рекомендовано органам исполнительной власти субъектов Российской Федерации разработать региональные целевые программы «Радон» и осуществлять их финансирование за счет бюджетов субъектов Российской Федерации, местных бюджетов и внебюджетных источников. В целом ряде субъектов РФ такие региональные целевые программы были разработаны, утверждены и постепенно стали реализовываться. Однако уже менее чем через два года после утверждения ФЦП «Радон» при рассмотрении хода ее реализации на заседании Правительственной комиссии 28.02.1996 г. было отмечено, что выполнение программы фактически сорвано из-за крайне неудовлетворительного ее финансирования [119].

Несмотря на такой короткий период существования ФЦП «Радон», она сыграла определенную роль в том, что основные требования по ограничению облучения населения при воздействии природных источников ионизирующего излучения вошли отдельной Статьей 15 в Федеральный закон «О радиационной безопасности населения» [120], который был принят в 1996 г.

В следующем году вышли два постановления Правительства Российской Федерации: «О порядке разработки радиационно-гигиенических паспортов организаций и территорий» от 28.01.1997 г. № 93 и «О порядке создания единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан» от 16.06.1997 г. № 718. Для реализации Постановления Правительства Российской Федерации от 28.01.1997 г. № 93 была разработана форма радиационно-гигиенических паспортов организаций (РГПО) и территорий (РГПТ), разработаны и утверждены Методические указания «Порядок заполнения и ведения радиационно-гигиенических паспортов организаций и территорий» [121].

Во исполнение Постановления Правительства Российской Федерации от 16.06.1997 г. № 718 приказами Минздрава Российской Федерации от 31.07.2000 г. № 298 и от 27.06.2001 г. № 224 был создан Федеральный Банк данных по дозам облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона (ФБДОПИ), который с 2001 г. функционирует в рамках Единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан (ЕСКИД).

В этот же период при формировании ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 г.» часть мероприятий ФЦП «Радон» вошла в отдельное направление «Охрана здоровья населения и профессиональных работников при различных видах радиационного воздействия». В рамках этого направления предусматривались два комплексных мероприятия: «Снижение уровня облучения населения и техногенного загрязнения окружающей среды природными радионуклидами», «Организация единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан и состояние здоровья групп риска населения, подверженных повышенным уровням радиационного воздействия».

Несмотря на довольно скромное финансирование исследований в рамках этих направлений, было выполнено масштабное обследование уровней природного облучения населения Республики Алтай, Еврейской автономной области, Республики Калмыкия, г. Балей, Забайкальского края, Уральского региона и отдельных территорий, медико-санитарное обеспечение которых осуществляет ФМБА России. [122–137]. Был разработан ряд важных в практическом отношении гигиенических нормативов, а также инструктивно-методических документов [138, 139, 174].

Таким образом, с принятием в 1991 г. Временных критериев для принятия решений и организации контроля [107] в России фактически впервые были введены нормативы по среднегодовому значению ЭРОА радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий. Эти нормативы предусматривали три уровня регулирования этого показателя. Для проектируемых и строящихся зданий жилищного и социально-бытового назначения среднегодовое значение ЭРОА

радона не должно превышать 100 Бк/м<sup>3</sup>, для эксплуатируемых зданий – 200 Бк/м<sup>3</sup>. В тех случаях, когда мероприятия по снижению ЭРОА радона в воздухе не позволяли снизить значение показателя ниже 400 Бк/м<sup>3</sup>, должен был решаться вопрос о переселении жильцов (с их согласия) и перепрофилировании помещений.

Практически в такой же форме эти нормативы были перенесены в последующем в российские НРБ-96 [111], хотя и с небольшими, но принципиальными изменениями. Дело в том, что в НРБ-96 также впервые были введены ограничения на облучение работников природными источниками излучения в производственных условиях в форме дозового предела – 5 мЗв/год.

Среднегодовое значение ЭРОА изотопов радона, соответствующее эффективной годовой дозе 5 мЗв, было принято равным 310 Бк/м<sup>3</sup>. В связи с этим формулировка последнего требования во «Временных критериях...» в НРБ-96 была изменена и стала следующей: *«Вопрос о переселении жильцов (с их согласия) и перепрофилировании помещений или сносе здания решается в тех случаях, когда невозможно снижение среднегодового значения ЭРОА изотопов радона до значения менее 400 Бк/м<sup>3</sup>»*. Как видно из этой формулировки, в НРБ-96 вместо «ЭРОА радона» уже появляется «ЭРОА изотопов радона», а наряду с перепрофилированием помещений рассматривается также возможность сноса здания. Это и понятно, поскольку для производственных зданий допустимое значение ЭРОА изотопов радона даже для случая монофакторного воздействия показателя примерно на четверть ниже значения 400 Бк/м<sup>3</sup>.

Однако ни введение «Временных критериев...», ни последующее принятие НРБ-96 заметного влияния на организацию системы обязательного контроля объектов строительства по ЭРОА радона в помещениях реально не оказали. Нормативы появились, однако законодательной базы, обеспечивающей обязательный порядок контроля, не было, поэтому эти измерения воспринимались, скорее, как добровольные и проводились эпизодически.

Реальным механизмом, который перевел этот вид контроля законченными строительством объектов в ранг обязательного, стал Федеральный Закон «О санитарно-эпидемиологическом благополучии

населения» [140]. В пункте 3 Статьи 12 Закона указано, что «предоставление земельных участков под строительство, а также ввод в эксплуатацию построенных и реконструированных объектов допускается при наличии санитарно-эпидемиологических заключений о соответствии таких объектов санитарным правилам», а далее в пункте 1 статьи 23 закона указано, что «жилые помещения по... уровню ионизирующих излучений... должны соответствовать санитарным правилам». Требования Закона вместе с определением самого термина «санитарно-эпидемиологическое заключение» как документа, удостоверяющего соответствие или несоответствие факторов среды обитания, продукции и услуг требованиям санитарных правил, фактически создали механизм контроля земельных участков под строительство, а также жилых и общественных зданий после окончания их строительства или капитального ремонта.

После введения в действие Федерального Закона № 52-ФЗ, а вслед за этим НРБ-99 [112] и чуть позже ОСПОРБ-99 [141] в стране постепенно наладилась система контроля показателей радиационной безопасности земельных участков под строительство, а также жилых и общественных зданий после окончания их строительства, реконструкции и капитального ремонта. Естественно, на этот период приходится и интенсивное развитие аппаратурно-методической базы радиационного контроля, систем аккредитации лабораторий радиационного контроля, качественное изменение уровня оснащенности таких лабораторий средствами измерений и методиками контроля, разработкой ряда инструктивно-методических документов.

Такой порядок проведения радиационного контроля земельных участков и объектов строительства сохранялся в стране почти 10 лет, поэтому большой интерес представляет оценка эффективности введения обязательного радиационного контроля и санитарно-эпидемиологической оценки содержания изотопов радона в помещениях жилых и общественных зданий. Актуальность такой оценки особенно возросла с введением нового Градостроительного кодекса России [142].

Анализ практики введенного в конце прошлого века обязательного радиационного обследования жилых и общественных зданий

после окончания их строительства показал устойчивую динамику постепенного заметного снижения ЭРОА радона в воздухе помещений. За этот период, который длился без малого 10 лет и формально завершился в связи с принятием нового Градостроительного кодекса России, содержание радона в воздухе помещений вновь построенных зданий существенно снизилось [143, 144]. Хотя этот вывод и получен на примере отдельных субъектов Российской Федерации, прежде всего, Санкт-Петербурга и Ростовской области, есть определенные основания считать, что в других субъектах Российской Федерации наблюдалась аналогичная тенденция [145, 146].

Что касается формальности завершения периода обязательно радиационного обследования зданий, то она связана не с отменой самих требований к показателям радиационной безопасности зданий и сооружений как таковых с введением нового Градостроительного кодекса и Технического регламента «О безопасности зданий и сооружений» [147], а с переводом этих требований из обязательных в ранг *декларируемых*.

Фактически с принятием нового Градостроительного кодекса и внесения целого ряда изменений в Федеральный закон № 52-ФЗ в вопросах обеспечения радиационной безопасности законченных строительством объектов произошел возврат к концу 90-х г. В принципе, такое положение дел в полной мере соответствует цивилизованным рыночным отношениям, когда производитель продукции (товаров, услуг и т.п.) должен быть сам заинтересован в их высоком качестве и полном соответствии всем требованиям безопасности и с этой целью должен обеспечивать необходимые виды и объем контроля.

Тем не менее, вызывает определенные опасения [148], что при отсутствии строгой необходимости виды и объем такого контроля будут недостаточными для оценки соответствия показателей радиационной безопасности зданий и сооружений требованиям санитарных правил и гигиенических нормативов. Вследствие этого в будущем вполне вероятно, что выраженная за последние 10 лет тенденция к снижению доз природного облучения населения может диаметрально измениться, как это произошло в Санкт-Петербурге [149].

При этом даже более пристальный контроль земельных участков под строительство, на который указывается в [149], и соблюдение требований к содержанию природных радионуклидов в строительных материалах не заменят радиационный контроль зданий после окончания их строительства. Показатели радиационной безопасности земельных участков и строительных материалов, которые в основном и определяют интенсивность поступления радона в здания, не всегда являются единственной причиной высокого содержания радона в помещениях. Часто решающую роль в балансе радона в зданиях играет неэффективная система вентиляции, конструкция современных окон и дверей, использование строительного сырья, радиологические характеристики которого не соответствуют требованиям гигиенических нормативов и т. д.

Поэтому, принятие решений о гарантированном соблюдении требований радиационной безопасности в зданиях, сдающихся в эксплуатацию после окончания строительства, капитального ремонта или реконструкции, на наш взгляд, может быть основано только на результатах комплексного радиационного обследования этих объектов.

### **7.2.2. Современное состояние нормативно-правового обеспечения ограничения облучения населения радоном в Российской Федерации**

В рекомендациях международных организаций и в большинстве зарубежных стран принята система отдельного нормирования ограничения облучения населения при воздействии радона в производственных и коммунальных условиях. В Российской Федерации переход к такой системе нормирования был окончательно оформлен в конце прошлого века с введением в действие НРБ-99. В них впервые введен дозовый предел облучения природными источниками излучения в производственных условиях для работников (5 мЗв/год) и производные величины от норматива по дозе для радона и других отдельных природных источников излучения при их воздействии на население в коммунальных условиях. За прошедшие почти два десятилетия эта идеология нормирования показала свою эффективность и сохранилась в нормативных правовых документах в нашей стране

до настоящего времени. Поэтому ниже рассматриваются отдельно современное состояние нормативно-правового обеспечения ограничения облучения населения за счет радона и других природных источников излучения в коммунальных и производственных условиях. Однако перед этим обратим внимание на некоторые принципиальные отличия в подходах к ограничению природного облучения в нашей стране и за рубежом.

В строгом понимании термин «норматив» как допустимое значение того или иного радиационного фактора природного происхождения в рекомендациях ВОЗ, МКРЗ, МАГАТЭ, а также и в других странах не устанавливается. Кроме того, только в Российской Федерации гигиенические нормы установлены по отношению ко всем регулируемым природным источникам излучения, хотя, как будет показано ниже, основной вклад в суммарные дозы облучения населения за счет всех природных источников излучения вносит радон с его короткоживущими ДПП. Поэтому, рассматривая современное состояние системы нормирования по ограничению природного облучения населения в нашей стране, мы в основном будем рассматривать именно этот источник излучения.

### **Требования по ограничению облучения населения за счет радона и других природных источников излучения в коммунальных условиях**

По данным радиационно-гигиенической паспортизации и Единой государственной системы контроля, и учета индивидуальных доз облучения граждан России (ЕСКИД) вклад природных источников ионизирующего излучения в суммарные дозы облучения населения за счет всех источников излучения в среднем по Российской Федерации составляет 83 %, достигая в некоторых субъектах 90 % и более. Причем в структуре доз природного облучения населения в среднем по стране около 60 % приходится на долю изотопов радона в воздухе жилых и общественных зданий [150, 151]. Более того, вклад радона остается основным даже в структуре доз облучения населения за счет всех источников ионизирующего излучения (табл. 7.7). И даже для жителей территорий Брянской области, которые облучаются за счет радиоак-

тивного загрязнения территории вследствие аварии на Чернобыльской АЭС в наибольшей степени в стране, вклад радона составляет почти 40 % от суммарных доз за счет всех источников излучения [151].

Таблица 7.7.

**Вклад изотопов радона в воздухе помещений (Rn) в суммарные дозы облучения населения за счет всех природных источников (ПНИ) и в суммарные дозы за счет всех источников ионизирующего излучения ( $\Sigma$ )**

Субъект РФ	$\Sigma$ , мЗв / год	ПНИ, мЗв / год	Rn / ПНИ, %	Rn / $\Sigma$ , %
Костромская область	2,51	2,18	45,87	39,84
Архангельская область	2,85	2,33	47,64	38,95
Новгородская область	3,95	3,40	55,29	47,59
Иркутская область	6,02	5,36	69,22	61,63
Забайкальский край	6,45	5,78	69,38	62,17
Ставропольский край	6,60	6,09	76,19	70,30
Еврейская АО	7,91	7,42	78,17	73,32
Республика Алтай	10,15	9,63	85,88	81,48
Брянская область	3,20	2,84	42,25	37,50
<b>Российская Федерация</b>	<b>4,00</b>	<b>3,37</b>	<b>58,15</b>	<b>49,00</b>

Как следует из данных табл. 7.7, вклад изотопов радона в воздухе помещений в суммарные дозы облучения населения за счет природных источников превышает 50 % для всех субъектов Российской Федерации, в которых средние дозы природного облучения жителей близки или превышают среднее значение этой величины для страны в целом. При этом, чем выше средние уровни природного облучения жителей, тем выше вклад изотопов радона в суммарные дозы их природного облучения. Для жителей субъектов РФ с наиболее высокими уровнями природного облучения этот вклад составляет от 69 % (Иркутская область и Забайкальский край) до 86 % (Республика Алтай). На территориях с низкими уровнями природного облучения населения (Архангельская, Костромская и Нов-

городская области и др.) вклад изотопов радона в суммарные дозы составляет чуть менее 50 %.

Структура доз облучения населения страны за счет всех природных источников излучения представлена в табл. 7.8, из которой следует, что вклад радона в суммарные дозы природного облучения является основным и составляет более 50 % [109, 150, 151].

Таблица 7.8.

**Структура облучения населения Российской Федерации за счет всех природных источников излучения (в среднем по стране)**

Компоненты до природного облучения жителей России, мЗв/год							Суммарная доза, мЗв/год
К-40	Космическая компонента	Внешнее терригенное	Радон	Питьевая вода	Пищевые продукты	Атмосферный воздух	
0,170	0,400	$\frac{0,660}{0,480^*}$	$\frac{1,960}{1,250^*}$	$\frac{0,143 + 0,033}{0,120^*}$		0,006	3,370

\* – среднемировые значения [163]

Естественно, что это требует кардинального пересмотра стратегии снижения уровней облучения населения за счет природных источников излучения. Наряду с наибольшим вкладом в суммарные дозы облучения населения радон в воздухе помещений характеризуется еще и наиболее широким диапазоном вариабельности. К тому же с определенными оговорками можно говорить о том, что радон как фактор природного облучения населения достаточно чувствителен к мероприятиям по снижению. Причем наиболее эффективными являются превентивные мероприятия по ограничению уровней облучения населения за счет радона в воздухе помещений.

В то же время в последние годы появляются новые виды строительного сырья, отделочных материалов и готовых изделий с заметно более высоким содержанием природных радионуклидов, которые также являются дополнительным источником поступления радона и

торона в жилые помещения. Расширяется их производство с вовлечением в технологию их изготовления новых компонент с существенно большим содержанием природных радионуклидов [152]. Все чаще строительство новых жилых и общественных зданий осуществляется на территориях с повышенным содержанием природных радионуклидов в приповерхностных слоях земли и, как следствие, с высокой эксхалацией радона с поверхности почв, а водоснабжение населения осуществляется из подземных водоносных горизонтов, вода которых во многих случаях имеет повышенное содержание как радона, так и других природных радионуклидов [153-155].

Рассматривая современные требования к ограничению природного облучения населения в производственных условиях, отмечено [156], что актуальность нормирования и проведения эффективных надзорных мероприятий по ограничению облучения населения радонном и другими природными источниками в последние годы только возрастает.

При подготовке раздела по обеспечению радиационной безопасности населения при воздействии природных источников излучения (включая радон) в коммунальных условиях в последней редакции Основных санитарных правил обеспечения радиационной безопасности была учтена актуальность проблемы, многолетний научный и практический опыт, проанализированы современные международные рекомендации в этой области. Кроме того, отдельные требования по ограничению облучения населения России природными источниками излучения в НРБ-99 и ОСПОРБ-99 [112, 141] были противоречивыми и на практике объективно трудно или вообще невыполнимы, что также потребовало новых решений и подходов.

Так, отсутствие в НРБ-99 требований к содержанию природных радионуклидов в готовых строительных изделиях, облицовочных изделиях и материалах и ряда других нормативов на практике приводило к тому, что результаты контроля показателей радиационной безопасности широкого класса современных изделий (которые потенциально могли быть источниками поступления изотопов радона в жилые помещения) фактически оставались без санитарно-эпидемиологической оценки. Более того, при строгом соблюдении терминологии НРБ-99

облицовочные изделия и материалы фактически не должны были применяться в строительстве, поскольку при их производстве обычно используются компоненты с повышенным содержанием природных радионуклидов.

В НРБ-99/2009 наряду со строительным сырьем и материалами введены также требования к допустимому содержанию природных радионуклидов в готовых строительных изделиях (п. 5.3.4), используемых при возведении зданий и сооружений, а в последующем в ОСПОРБ-99/2010 [157] введены также ограничения на содержание природных радионуклидов в облицовочных изделиях и материалах. В связи с этим требовалось довести до сведения организаций, участвующих в обращении с этими изделиями (производство, продажа, использование), информацию о необходимости контроля за показателями радиационной безопасности изделий, в том числе импортируемых, при использовании их для строительства зданий и сооружений. При этом важным элементом оперативного контроля должно быть наличие в сопроводительной документации численных значений эффективной удельной активности природных радионуклидов на каждый вид такой продукции (п. 5.1.15 ОСПОРБ-99/2010).

Следует отметить, что в этом же пункте ОСПОРБ-99/2010 указано, что *«применение этой продукции допускается при наличии санитарно-эпидемиологического заключения органов, осуществляющих государственный санитарно-эпидемиологический надзор»*. Однако, несмотря на то, что введением в действие Единого перечня товаров [158] выдача санитарно-эпидемиологических заключений на эту продукцию отменена, тем не менее она отнесена к группе товаров, подлежащих санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю). Это означает, что требования к показателям радиационной безопасности этой продукции по-прежнему действуют, только выполнение этих требований фактически возложены на производителя, поставщика и т. п. А осуществление надзора за соблюдением этих требований, как и ранее, остается за органами Роспотребнадзора.

Пунктами 5.3.2 и 5.3.3 НРБ-99/2009 установлены требования к показателям радиационной безопасности как эксплуатируемых жи-

лых домов, общественных зданий и сооружений, так и сдающихся в эксплуатацию после окончания их строительства, капитального ремонта и реконструкции.

В развитие этих требований в п. 5.1.4 ОСПОРБ-99/2010 установлены требования к порядку принятия решения в тех случаях, когда показатели радиационной безопасности жилых и общественных зданий не соответствуют установленным нормативам: *«Если показатели радиационной безопасности зданий жилищного и общественного назначения (части помещений) превышают установленные значения, то предусматриваются мероприятия по их снижению. При невозможности снизить значения одного или обоих показателей до нормативного уровня без нарушения целостности здания рассматривается вопрос о переселении жильцов и перепрофилировании здания или части помещений, или о сносе здания»*. Практически такая же норма в п. 5.2.2 ОСПОРБ-99/2010 установлена в отношении производственных зданий и сооружений при несоответствии их показателей радиационной безопасности установленным гигиеническим нормативам.

Важно отметить, что в действующих нормативных документах предусмотрена необходимость организации надзора за безусловным выполнением этих требований в тех случаях, когда жилые дома, а также общественные здания и сооружения не соответствуют установленным требованиям по показателям радиационной безопасности. Порядок направления в адрес домовладельцев предписаний о необходимости проведения мероприятий по нормализации радиационной обстановки в здании с последующим контролем их исполнения прямо определен п. 5.1.7 ОСПОРБ-99/2010: *«Для проверки соответствия зданий жилищного и общественного назначения требованиям пунктов 5.3.2 и 5.3.3 НРБ-99/2009 на всех стадиях строительства, реконструкции, капитального ремонта и эксплуатации зданий жилищного и общественного назначения проводится радиационный контроль. В случаях обнаружения превышения нормативных значений должен проводиться анализ связанных с этим причин и осуществляться необходимые защитные мероприятия, направленные на снижение мощности дозы гамма-излучения и/или содержания радона в воздухе помещений»*.

В связи с введением нового Градостроительного кодекса Российской Федерации [142], ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [147] с одновременной отменой требований об обязательном оформлении санитарно-эпидемиологических заключений на жилые, общественные и производственные здания после окончания их строительства постепенно создается ситуация, когда контроль за обеспечением радиационной безопасности населения в строительной индустрии целиком перекладывается на застройщиков. В этих условиях возможности надзора за обеспечением радиационной безопасности населения в важнейшей сфере формирования их облучения со временем значительно сокращаются, поэтому крайне важно искать пути повышения эффективности надзора за обеспечением радиационной безопасности населения при воздействии природных источников излучения в коммунальных условиях [147, 159].

Учитывая реальную ситуацию с уровнями природного облучения населения, в п. 5.1.2 ОСПОРБ-99/2010 введены три уровня оценки степени радиационной безопасности населения при облучении природными источниками излучения в коммунальных условиях. При средних по субъекту Федерации значениях суммарных доз менее 5 мЗв/год уровень облучения населения от природных источников излучения считается приемлемым, при дозах свыше 5 до 10 мЗв/год – облучение является повышенным, а при дозах более 10 мЗв/год – облучение считается высоким.

В связи с этим необходимо провести оценку численности жителей в субъектах Федерации, которые облучаются в дозах свыше 5, до 10 мЗв/год (повышенное облучение), и в дозах более 10 мЗв/год (высоко облучение). Такая информация нужна для анализа уровня радиационной безопасности населения региона и обоснования необходимости разработки региональных программ снижения доз природного облучения населения. В этих программах должно быть предусмотрено, что мероприятия по снижению уровней облучения природными источниками излучения должны осуществляться в первоочередном порядке для групп населения, подвергающихся облучению в дозах более 10 мЗв/год.

Таким образом, несмотря на отмеченные выше определенные недостатки в действующей системе нормирования, представляется, что с введением в действие НРБ-99/2009 и ОСПОРБ-99/2010, а также СанПиН 2.6.1.2800-10 [160] в стране было завершено формирование достаточно эффективной системы норм и требований по ограничению облучения населения природными источниками ионизирующего излучения в коммунальных условиях, что в целом позволяет обеспечить вполне приемлемый уровень радиационной безопасности населения Российской Федерации.

### **Требования по ограничению облучения населения за счет радона и других природных источников излучения в производственных условиях**

При подготовке раздела по обеспечению радиационной безопасности населения при воздействии природных источников излучения в производственных условиях в новой редакции ОСПОРБ-99/2010 была учтена актуальность проблемы, многолетний научный и практический опыт, проанализированы современные международные рекомендации в этой области. Кроме того, часть требований по ограничению облучения населения России природными источниками в НРБ-99, а в дальнейшем и НРБ-99/2009, ОСПОРБ-99/2010 и СП 2.6.1.1292-03 [112, 113, 157, 161] противоречат друг другу и на практике объективно не выполнимы, что также потребовало обоснования новых решений и подходов.

Так, требования по ограничению облучения населения природными источниками излучения в производственных условиях в редакции п. 4.1 НРБ-99, в последующем внесенные п. 4.1 НРБ-99/2009 без изменений, с учетом требований п. 5.1.5 ОСПОРБ-99, при одновременном отсутствии прямых нормативов на показатели радиационной безопасности производственных зданий и сооружений создавали серьезные сложности. Необходимость соблюдения этих требований на практике приводила к двум практически неразрешимым проблемам.

Во-первых, при невозможности снижения доз природного облучения в производственных условиях до уровня ниже 5 мЗв/год требовалось переводить персонал в категорию группы А, но уже по

критерию «природного облучения». Очевидно, что применение этого требования в ОСПОРБ-99 к работникам радиационных объектов и персоналу группы Б еще можно было понять, а по отношению к персоналу группы А такое требование звучало более чем странно. Во-вторых, прямое применение этого требования к работникам других производств формально допускало переводить в категорию группы А огромное количество работников любых производств (кафе, парикмахерских и т. п.), размещенных в подвальных этажах существующих зданий, в которых обычно и наблюдается достаточно высокое содержание изотопов радона в воздухе.

Связано это с тем, что требование п. 4.1 НРБ-99/2009 по ограничению природного облучения относится к суммарной дозе облучения работников без разделения ее на вклад за счет показателей радиационной безопасности здания и самого производства, поскольку требования к производственным зданиям и сооружениям в нормативных документах отсутствовали вовсе. Вследствие этого при радиационном контроле вновь построенных производственных зданий и сооружений их санитарно-эпидемиологическая оценка должна была проводиться именно на соответствие суммарной дозе 5 мЗв/год. Нетрудно видеть, что при таком подходе фактически получалось, что работники всех предприятий, в которых характер производства связан с дополнительным облучением за счет, например, использования минерального сырья и материалов с повышенным содержанием природных радионуклидов, неизбежно попадали в число организаций с перспективой перевода части работников в категорию группы А.

С целью разрешения этих противоречий при разработке новой редакции ОСПОРБ-99/2010 [157] было обосновано введение отдельных требований к показателям радиационной безопасности вновь строящихся и эксплуатируемых производственных зданий и сооружений. Для вновь строящихся объектов эти требования сформулированы в следующей редакции: *«5.2.1. При проектировании производственных зданий и сооружений должно быть предусмотрено, чтобы после окончания их строительства, капитального ремонта или реконструкции среднегодовая эквивалентная равновесная объем-*

*ная активность дочерних продуктов радона и торона в воздухе помещений  $ЭРОА_{Rn} + 4,6 \cdot ЭРОА_{Tn}$  не превышала  $150 \text{ Бк/м}^3$ , а мощность эквивалентной дозы гамма-излучения не превышала  $0,6 \text{ мкЗв/ч}$ .*

Требования к эксплуатируемым производственным объектам сформулированы в редакции, близкой к формулировке аналогичных требований НРБ-96 [111] к эксплуатируемым жилым зданиям: «5.2.2. Среднегодовые значения ЭРОА изотопов радона в помещениях эксплуатируемых производственных зданий и сооружений не должны превышать  $300 \text{ Бк/м}^3$ , а мощность эквивалентной дозы гамма-излучения –  $0,6 \text{ мкЗв/ч}$ . При невозможности снизить ЭРОА изотопов радона ниже  $300 \text{ Бк/м}^3$  и/или мощности эквивалентной дозы гамма-излучения ниже  $0,6 \text{ мкЗв/ч}$  решается вопрос о перепрофилировании здания или части его помещений». Отличие заключается только в том, что в НРБ-96 устанавливалось не прямое ограничение мощности дозы в помещениях жилых зданий, а по ее разности внутри и на открытой местности.

Очевидно, что введение этих требований позволяет полностью разрешить указанные выше противоречия: если вновь строящееся и эксплуатируемые производственные здания или сооружения соответствуют установленным требованиям по содержанию изотопов радона в воздухе и мощности дозы гамма-излучения в помещениях, то необходимость в дальнейшем радиационном контроле доз природного облучения работников отпадает. Одновременно и для персонала радиационных объектов отпадает необходимость в контроле и оценке доз природного облучения, переводе их в категорию группы А и т.д., если показатели радиационной безопасности зданий этих объектов соответствуют установленным требованиям.

Следует особо отметить, что эти требования к производственным зданиям и сооружениям в редакции ОСПОРБ-99/2010 сформулированы однозначно и не допускают двоякого толкования: при несоответствии одного или обоих показателей вновь строящихся или эксплуатируемых объектов установленным требованиям имеется единственная возможность дальнейшего их использования – перепрофилирование здания или части его помещений.

Требования к показателям радиационной безопасности земельных участков под строительство производственных зданий и сооружений в ОСПОРБ-99/2010 в части ограничений по значению плотности потока радона с поверхности грунта в пределах контура застройки остались практически неизменными. Однако к ним добавлены ограничения по мощности дозы гамма-излучения. Оба установленных ограничения для земельных участков, как это было и ранее, сформулированы не в форме нормативов, а в форме гигиенических критериев: «...при проектировании здания на участке с мощностью эквивалентной дозы гамма-излучения выше 0,6 мкЗв/ч, плотностью потока радона с поверхности грунта более 250 мБк/(м<sup>2</sup>·с) в проекте должна быть предусмотрена система защиты здания от повышенных уровней гамма-излучения и радона».

Серьезные сложности возникали при применении на практике требования ОСПОРБ-99 к производственному контролю за дозами природного облучения работников. Главным образом это связано с очень низким критерием отнесения доз природного облучения работников к повышенным уровням, начиная с 1 мЗв/год. Это требовало установления практически тотального радиационного контроля за природным облучением работников всех производств [156, 162]. Причем при эффективных дозах от 1 до 2 мЗв/год в ОСПОРБ-99 требовалось вводить периодический контроль доз природного облучения работников, при больших уровнях облучения – постоянный радиационный контроль доз, а также разработку и осуществление мероприятий по снижению уровней облучения работников. Вследствие этого данная норма на практике просто не работала.

Для устранения этого противоречия в ОСПОРБ-99/2010, кроме введения требований к самим производственным зданиям и сооружениям, прямо перечислены отрасли промышленности, в которых в связи с характером производственного процесса существует потенциальная возможность дополнительного облучения работников: обращение с минеральным сырьем или производственными отходами с повышенным содержанием природных радионуклидов, размещение производства в подземных условиях и т. д. В соответствии с п. 5.2.6 ОСПОРБ-99/2010 из всех организаций требования по ограничению

производственного облучения природными источниками излучения распространяются только на те из них, которые «...осуществляют работы в подземных условиях (неурановые рудники, шахты, подземные производства), добывают и перерабатывают минеральное и органическое сырье и подземные воды, используют минеральное сырье и материалы с  $A_{эфф}$  более 740 Бк/кг или продукцию на их основе, а также в результате деятельности которых образуются производственные отходы с  $A_{эфф}$  более 1500 Бк/кг».

Укажем, что в соответствии с п. 5.1.1 ОСПОРБ-99 эти требования распространялись на все без исключения организации, в которых облучение работников от природных источников превышало 1 мЗв/год. Интересно заметить, что при этом организации с потенциально наиболее высокими уровнями природного облучения работников здесь были перечислены как частный случай.

В ОСПОРБ-99/2010 радиационный контроль, как составная часть производственного контроля, должен осуществляться только в тех организациях, которые перечислены выше. При этом радиационному контролю в таких организациях подлежат годовые эффективные дозы облучения работников за счет природных источников излучения, а также эффективная удельная активность природных радионуклидов в используемом сырье, материалах и изделиях, в готовой продукции, при производстве которой применяются сырье и материалы с  $A_{эфф}$  более 740 Бк/кг, а также производственные отходы. Важно указать на принципиальное отличие требований ОСПОРБ-99/2010 в отношении производственного радиационного контроля и мероприятий по снижению доз облучения работников: виды, объем и периодичность контроля должны быть достаточными для подтверждения того, что дозы облучения работников не превышают 5 мЗв/год.

Серьезной переработке и изменению подверглось требование п. 5.1.5 ОСПОРБ-99 относительно условий приравнивания работников к категории персонала. Эта норма теперь стала более жесткой и однозначной: «В случае превышения дозы облучения 5 мЗв/год должны приниматься меры по снижению доз облучения работников ниже этого уровня или рассматриваться вопрос о прекращении (приостановке) работ. В случаях, когда экономически обоснованные защит-

*ные мероприятия не позволяют обеспечить на отдельных рабочих местах облучение работников в дозе менее 5 мЗв/год, допускается отнесение соответствующих работников по условиям труда к персоналу группы А».*

Нетрудно видеть, что, во-первых, данная норма может быть применима теперь только к организациям конкретных отраслей промышленности, а не ко всем организациям, перечисленным в п. 5.1.1 ОСПОРБ-99. Во-вторых, вместо расплывчатого определения *«при невозможности соблюдения указанного норматива»* в ОСПОРБ-99/2010 введено конкретное однозначное условие: *«когда экономически обоснованные защитные мероприятия не позволяют обеспечить»* соблюдение установленного норматива по дозе природного облучения работников в производственных условиях.

Текст п. 5.1.6 ОСПОРБ-99 заменен следующим требованием: *«Обращение в производственных условиях с сырьем, материалами и изделиями с эффективной удельной активностью природных радионуклидов до 740 Бк/кг, а также с производственными отходами с эффективной удельной активностью природных радионуклидов до 1500 Бк/кг допускается без ограничений по радиационному фактору»*. В старой редакции этот пункт не содержал норм или требований вообще: в нем только указывалось, что использование полезных ископаемых с повышенным содержанием природных радионуклидов должно осуществляться с соблюдением неопределенных мер радиационной безопасности. Однако в условиях, когда понятие «повышенное содержание природных радионуклидов» в документе не определено, эти меры становятся еще более расплывчатыми.

Таким образом, в новой редакции ОСПОРБ-99/2010 удалось разрешить значительную часть существовавших ранее противоречий по ограничению облучения населения природными источниками излучения в производственных и коммунальных условиях. Внесенные изменения большей частью имеют принципиальный характер и направлены на установление объективных, выполнимых и легко контролируемых ограничений на облучение населения природными источниками излучения в производственных условиях. Нам представляется, что с введением в действие ОСПОРБ-99/2010, а в дальней-

шем с переработкой СП 2.6.1.1292-03 и принятием взамен СанПиНа 2.6.1.2800-10 [160] в Российской Федерации выстроена эффективная система норм и требований по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения, что позволит существенно повысить радиационную безопасность населения Российской Федерации.

### **7.2.3. Структура доз и уровни облучения населения РФ за счет радона в воздухе помещений и других природных источников излучения**

Одним из наиболее серьезных достижений за последние 15 лет в изучении проблемы облучения населения природными источниками излучения следует считать то, что на рубеже веков в Российской Федерации была создана и функционирует уникальная государственная система сбора данных по дозам облучения населения за счет всех природных источников излучения (в том числе радона). Уникальность этой системы состоит, прежде всего в следующем:

- она охватывает население всех субъектов Российской Федерации;
- в ней аккумулируются результаты измерений, которые выполняются с различной целью всеми аккредитованными испытательными лабораториями ЦГиЭ Роспотребнадзора и ФМБА России, а также испытательными лабораториями коммерческих организаций;
- все измерения проводятся в соответствии с единым методическим и метрологическим обеспечением и представляются в едином формате в системе региональных и Федерального банков данных по дозам облучения населения страны за счет природных источников излучения;
- в нее вносятся результаты измерений или расчетов всех компонентов природного облучения населения;
- она содержит все основные характеристики объектов контроля (строительные характеристики, сведения о строи-

тельных материалах и системе водоснабжения и отопления, адресные данные, время постройки и др.), что позволяет при необходимости выделять объекты с конкретными признаками, характеризующими их радиационную опасность.

Данная система сбора данных функционирует на базе отчетных форм федерального статистического наблюдения № 4-ДОЗ «Сведения о дозах облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона», которая является подсистемой Единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан Российской Федерации (ЕСКИД). В рамках ЕСКИД, кроме сведений о дозах природного облучения населения, аккумулируются также данные о дозах медицинского облучения населения (отчетная форма № 3-ДОЗ), данные о дозах техногенного облучения персонала радиационных объектов в условиях нормальной эксплуатации (форма № 2-ДОЗ), а также данные по индивидуальным дозам облучения граждан при радиационных авариях. В отличие от трех других ежегодных отчетных форм федерального статистического наблюдения в системе ЕСКИД, радиационно-гигиенической паспортизации территорий (РГПТ) и системы социально-гигиенического мониторинга (СГМ), информационно-аналитическая система сбора данных о дозах облучения населения за счет природных источников имеет кумулятивный характер.

Данная подсистема ЕСКИД с самого начала построена на основе учета по принципу нарастающего итога. В ней данные измерений за все последующие годы объединяются в единое множество и анализируются в комплексе. Причем, поскольку каждая единица измерений в рамках отчетных форм № 4-ДОЗ, кроме результатов измерений, содержит также адресную информацию, то при необходимости она позволяет персонифицировать дозы природного облучения отдельных групп жителей, проживающих в конкретном жилом доме или жилой единице. Вся получаемая информация накапливается и постоянно хранится в Региональных банках данных по дозам природного облучения населения в субъектах РФ (РБДОПИ). На основе системы РБДОПИ далее формируется персонифицированный Федеральный

Банк данных по дозам природного облучения населения РФ (ФБДО-ПИ), который организован и функционирует на базе ФБУН Научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П. В. Рамзаева.

Информация о компонентах природного облучения населения страны, которая собирается на территории всех субъектов РФ для различных целей (ЕСКИД, СГМ, надзорные мероприятия и т. д.) и отвечает установленным требованиям по полноте, качеству и достоверности, в конечном итоге поступает в ФБДОПИ. В отчетную форму № 4-ДОЗ вносятся результаты измерений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений, мощность дозы гамма-излучения в домах и открытой местности на территории населенных пунктов, уровни удельной активности радионуклидов в питьевой воде и основных компонентах рациона питания. Тем самым обеспечивается комплексная характеристика воздействия на население всех природных источников излучения [109].

К настоящему времени государственная система сбора данных по дозам облучения населения Российской Федерации за счет природных источников излучения действует уже около 15 лет. Интересно отметить, что даже в условиях отсутствия целевого финансирования системы на уровне РБДОПИ наиболее значимым итогом следует признать то, что систематические измерения для оценки компонентов природного облучения населения проводятся во всех субъектах РФ, кроме Ненецкого АО. Если в первые годы формы № 4-ДОЗ с разной степенью полноты заполнялись в 70–75 субъектах Российской Федерации, то в последние 5–6 лет на большинстве территорий РБДОПИ сформированы и постоянно пополняются фактическими данными в электронной форме с использованием единого программного обеспечения.

За этот период заметно возросло число субъектов Российской Федерации, в которых систематически проводились измерения всех параметров радиационной обстановки, определяющих уровни и структуру доз облучения населения природными источниками излучения. Так, в первые годы заполнения отчетных форм № 4-ДОЗ

измерения ЭРОА изотопов радона проводились в 60–70 субъектах, а контроль содержания радионуклидов в питьевой воде и пищевых продуктах не проводился до 2005 г. вообще. Уже в 2013–2014 гг. контроль ЭРОА изотопов радона проводился уже во всех субъектах кроме двух, измерения удельной активности природных радионуклидов в питьевой воде почти в 60 субъектах Российской Федерации, а на 70 территориях проводились инструментальные анализы удельной активности природных и техногенных радионуклидов в основных компонентах рациона питания. Заметим, что после 2012 г. число субъектов Российской Федерации, в которых проводились исследования по определению удельной активности радионуклидов в пищевых продуктах, резко снизилось до 5–6 (Санкт-Петербург, Ростовская и Астраханская области и др.) в связи с тем, что в отчетные формы № 4-ДОЗ данные о содержании  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  перестали вноситься (они вносятся только в радиационно-гигиенические паспорта территорий).). В указанных регионах проводится определение удельной активности отдельных природных радионуклидов (в основном,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  и др.) в пробах пищевых продуктов в незначительном количестве. Таким образом, в настоящее время в ФБДОПИ имеются сведения о дозах природного облучения 99,97 % населения страны. На наш взгляд, в определенной мере этому способствовало образование в 2007 г. в соответствии приказами Роспотребнадзора от 09.01.2007 г. № 1 и от 19.03.2013 г. № 139 восьми межрегиональных радиологических центров (МРЦ) в федеральных округах. Одна из основных задач МРЦ состоит в оказании методической и практической помощи организациям Роспотребнадзора при проведении этих исследований.

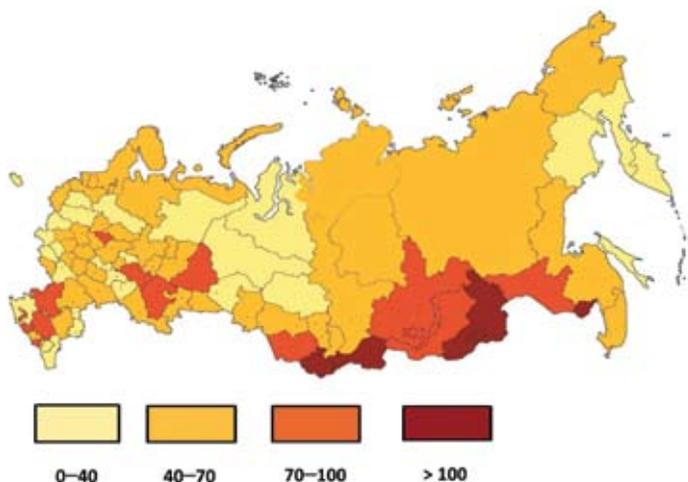
Анализ собранных данных позволил получить комплексную характеристику уровней облучения и структуру доз природного облучения населения всех субъектов РФ и страны в целом [109, 122–137]. В результате этих исследований установлено, что:

- средняя по стране индивидуальная годовая эффективная доза облучения населения за счет всех природных источников излучения составляет около 3,4 мЗв/год, причем наибольшая ее часть формируется за счет облучения населе-

ния изотопами радона в воздухе помещений – в среднем около 58 %;

- примерно три четверти населения страны имеют средние дозы облучения за счет всех природных источников излучения в диапазоне от 2,0 до 4,0 мЗв/год;
- среднегодовые эффективные дозы природного облучения 10,2 % населения (около 15 млн чел.) превышают 5 мЗв/год, а дозы природного облучения 0,78 % населения (около 1,1 млн чел.) превышают 10 мЗв/год;
- практически все население, которое подвергается повышенному (свыше 5 мЗв/год) и высокому (свыше 10 мЗв/год) облучению природными источниками излучения, проживает на территории 17 субъектов РФ с общей численностью населения около 30 млн чел.;
- в Российской Федерации имеются два субъекта с наиболее высокими уровнями природного облучения: средние дозы облучения жителей Республики Алтай близки к 10 мЗв/год, а средние дозы природного облучения жителей Еврейской АО составляют около 7,0 мЗв/год.

Сведения, аккумулированные в Федеральном банке данных о распределении среднегодовых значений концентраций радона ( $\text{Бк}/\text{м}^3$ ) можно представить в виде карты по субъектам Российской Федерации, которая изображена на рис. 7.15. В Российской Федерации нет официальных данных о вкладе радона в смертность от рака легкого. Согласно расчетам, проведенным авторами [173] с использованием наиболее обоснованного подхода к оценке радиационного риска (модель «Висмут»), среди населения Российской Федерации из 65 тысяч случаев заболеваемости раком легкого в год до 10 тысяч случаев может быть вызвано воздействием радона и дочерних продуктов его распада. Атрибутивный пожизненный риск рака легкого, индуцированного радоном, составляет 14,8 % [174].



*Рис. 7.15. Распределение субъектов Российской Федерации в зависимости от среднегодовых значений объемной активности радона ( $\text{Бк}/\text{м}^3$ ) (представлено в виде карты на основании сведений, аккумулированных в Федеральном банке данных).*

На территории ряда субъектов Российской Федерации выявлено более 50 групп жителей численностью от нескольких десятков человек до нескольких тысяч человек, дозы природного облучения которых составляют 20–30 мЗв/год и более. А средние дозы облучения жителей г. Балей Забайкальского края только за счет изотопов радона в воздухе помещений составляют около 13 мЗв/год, достигая для отдельных групп жителей 100 мЗв/год и выше.

В зависимости от потенциальной радоноопасности территории структура доз и уровни природного облучения населения отдельных субъектов РФ характеризуются значительной вариабельностью (табл. 7.9).

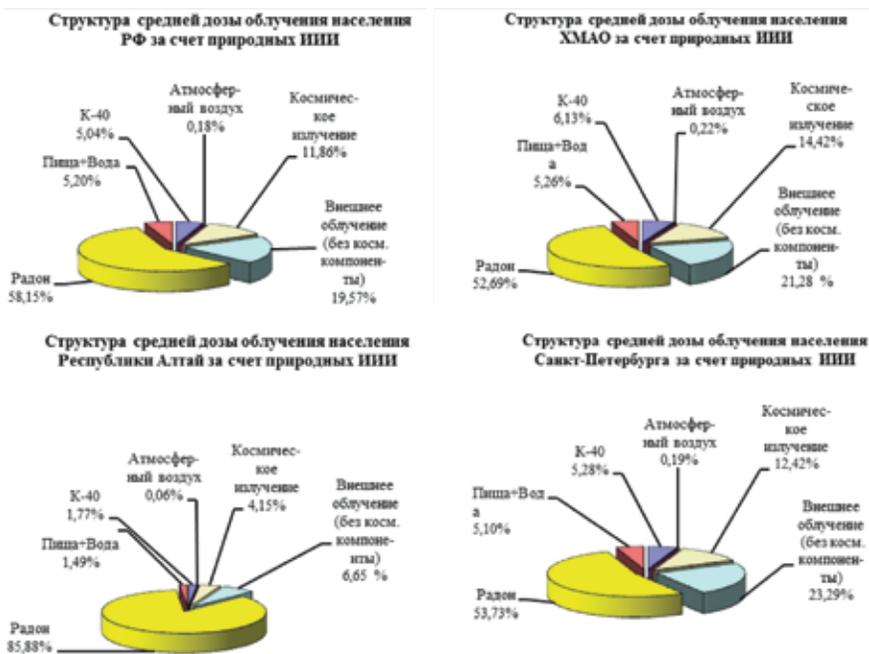
Таблица 7.9

**Структура средних доз облучения населения РФ  
и отдельных территорий природными источниками излучений  
по данным измерений за 2001–2014 гг.**

Средняя годовая доза за счет отдельных природных источников, мЗв/год							
К-40	Космическая компонента	Внешнее территориное облучение	Радон	Питьевая вода	Пищевые продукты	Атмосферный воздух	Суммарная доза
ХМАО–Югра							
0,17	0,40	0,59	1,46	0,021	0,125	0,006	2,77
Республика Алтай							
0,17	0,40	0,64	8,27	0,018	0,125	0,006	9,63
Санкт-Петербург							
0,17	0,40	0,75	1,73	0,045	0,119	0,006	3,22
<b>Российская Федерация</b>							
<b>0,17</b>	<b>0,40</b>	<b>0,66</b>	<b>1,96</b>	<b>0,143</b>	<b>0,033</b>	<b>0,006</b>	<b>3,37</b>

Однако, как указано выше и следует из данных табл. 7.9, независимо от структуры доз и суммарных уровней облучения населения за счет всех природных источников излучения, основной вклад в облучение населения на всех без исключения территориях субъектов Российской Федерации формируется за счет изотопов радона и их короткоживущих дочерних продуктов распада в воздухе помещений. Причем вклад изотопов радона в воздухе помещений остается наиболее высоким и составляет около 50 % и более от суммарных доз облучения населения за счет всех источников излучения даже на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС. В качестве примера, иллюстрирующего относительный вклад отдельных природных источников в суммарные дозы облучения населения, приведена структура доз, полученных жителями наиболее облучаемого субъекта Российской Федерации

(Республика Алтай) и двух субъектов, дозы облучения которых близки к средним по стране (рис. 7.16).



*Рис. 7.16. Сравнительная характеристика структуры облучения населения отдельных субъектов Российской Федерации за счет природных источников излучения*

Как следует из данных табл. 7.9, в структуре доз облучения населения Российской Федерации за счет природных источников излучения величина всех компонентов, кроме двух, близка к их среднемировым значениям. Заметно превышают среднемировые уровни только дозы облучения населения за счет изотопов радона в воздухе помещений, а также уровни облучения за счет содержания природных радионуклидов в пищевых продуктах и питьевой воде [164]. Несколько более высокими являются также оценки доз внешнего облучения населения страны, однако, вероятнее всего, это является следствием ряда методических и аппаратурных про-

блем, связанных с измерением мощности дозы гамма-излучения [164, 165].

Для территории нашей страны более высокие уровни радонового компонента природного облучения населения в значительной мере связаны с более суровыми климатическими условиями и разнообразием геофизических характеристик территории [109, 166]. Если среднемировое значение ОА радона в воздухе помещений составляет около  $40 \text{ Бк/м}^3$  [163], то по данным инструментальных измерений для территории нашей страны эта величина примерно в полтора раза выше [109, 168]. Интересно отметить, что эта оценка хорошо описывается так называемой широтной моделью зависимости ОА радона в воздухе помещений, которая описана в [163, 166], подтверждена в [168].

Различия в среднемировых и среднероссийских уровнях облучения населения за счет содержания радионуклидов в пищевых продуктах и питьевой воде ( $0,176 \text{ мЗв/год}$ ) по сравнению со среднемировым уровнем этой величины ( $0,120 \text{ мЗв/год}$ ) связаны, по-видимому, с тем, что в отчетных формах № 4-ДООЗ в период 2006–2012 гг. учитывался вклад как природных, так и техногенных радионуклидов в облучение населения.

Несмотря на относительно невысокие в среднем по стране уровни облучения населения Российской Федерации за счет всех природных источников излучения, большую тревогу вызывает наличие на отдельных территориях групп населения численностью от нескольких десятков до многих тысяч человек, которые облучаются в дозах, значительно превышающих не только нормативные значения, но и допустимые уровни для персонала радиационных объектов ( $20 \text{ мЗв/год}$  в среднем за последовательные 5 лет для персонала группы А).

Заметим, что нормативному среднегодовому значению ЭРОА изотопов радона в воздухе эксплуатируемых жилых и общественных зданий  $200 \text{ Бк/м}^3$  соответствует годовая эффективная доза облучения населения за счет этого фактора более  $10 \text{ мЗв}$ . По данным инструментальных измерений на территории целого ряда субъектов выявлены большие группы жилых и общественных зданий, в том числе детских дошкольных и школьных учреждений со значительно более высокими

уровнями ЭРОА изотопов радона в воздухе. К числу таких субъектов относятся Республика Алтай со среднегодовыми уровнями ЭРОА радона в воздухе отдельных групп помещений до 640 Бк/м<sup>3</sup>, Ростовская область (до 745 Бк/м<sup>3</sup>), Челябинская (более 1000 Бк/м<sup>3</sup>) и Иркутская (до 700 Бк/м<sup>3</sup>) области и др. Особняком в ряду детально обследованных населенных пунктов стоит г. Балей Забайкальского края, в котором средняя доза облучения жителей только за счет радона в воздухе помещений составляет около 13 мЗв/год. Укажем, что данные по г. Балею получены с использованием интегральных методов измерений с экспозицией не менее 2–3 месяцев. Аналогичные данные получены для жилых и общественных зданий Республики Алтай (обследовано более 1000 зданий), Еврейской АО (около 500 зданий), Ленинградской и Иркутской областей, Республики Адыгея и др.

Кроме понимания реальной ситуации с уровнями и структурой доз природного облучения населения страны, полученные данные легли в основу коренной переработки системы нормативно-правового обеспечения радиационной безопасности населения РФ при воздействии природных источников излучения. Так, в ОСПОРБ-99/2010 впервые была дана классификация уровней облучения населения природными источниками излучения, основанная на реальных данных об уровнях и структуре доз облучения населения страны. В ОСПОРБ-99 приемлемым считалось облучение населения в дозах менее 2 мЗв/год, который во многом был принят по данным [163]. Однако уже в 2003 г. при подготовке СП 2.6.1.1292-03 [161], когда была получена достаточно корректная оценка величины данного показателя, этот уровень был поднят уже до 5 мЗв/год. Естественно, что в ОСПОРБ-99/2010 в качестве приемлемого уровня природного облучения населения РФ в коммунальных условиях принято значение 5 мЗв/год, в корректности которого к этому времени сомнений уже не было.

В ОСПОРБ-99/2010 и СанПиН 2.6.1.2800-10 дозы природного облучения населения свыше 5 до 10 мЗв/год считаются повышенными, а дозы более 10 мЗв/год – высокими. Фактически с введением классификации уровней природного облучения населения в РФ обозначен национальный ориентир в отношении уровня приемлемого риска

для данного фактора, как фундаментальной характеристики территории нашей страны. Одновременно с этим в НРБ-99/2009, ОСПОРБ-99/2010 и СанПиН 2.6.1.2800-10 были обоснованы современные подходы к нормированию радиационной безопасности питьевого водоснабжения населения [109, 155, 169, 170], введен гигиенический норматив по содержанию природных радионуклидов в облицовочных изделиях и материалах, дано более обоснованное значение допустимого содержания природных радионуклидов в минеральных удобрениях и агрохимикатах. Наконец, с введением отдельных требований к показателям радиационной безопасности производственных зданий и производственной среды стали однозначными требования по обеспечению радиационной безопасности при облучении работников природными источниками излучения в производственных условиях [109, 171, 172].

Таким образом, в настоящее время в Российской Федерации сложилась вполне гармоничная система нормативно-правового и инструктивно-методического обеспечения радиационной безопасности населения при воздействии природных источников излучения. В стране имеется хорошо отлаженная система сбора данных по дозам природного облучения населения. В рамках Федерального и Региональных банков данных собран огромный массив сведений, который дает полную характеристику структуры доз и уровней облучения населения Российской Федерации в коммунальных условиях. Наличие систематизированных и объективных данных позволяет планировать и реализовывать мероприятия, направленные на снижение уровней природного облучения населения в субъектах РФ. Можно с уверенностью говорить, что ситуация с ограничением облучения населения страны природными источниками излучения в целом находится под контролем. Однако говорить об ее полном совершенстве пока трудно в силу нерешенности следующих двух основных проблем.

Первая, но не самая главная из них, заключается в необходимости внесения серьезных корректив в существующую систему сбора данных по дозам природного облучения населения. Один из важнейших аспектов данной проблемы связан с обеспечением радиационной безопасности работников предприятий неядерных отраслей промышленности.

Эта проблема обусловлена, с одной стороны с высокими, а в некоторых случаях и очень высокими дозами природного облучения работников, достигающими на отдельных производствах или участках 50–100 мЗв/год [109], с другой – с гигантскими объемами производственных отходов с повышенным содержанием природных радионуклидов, которые уже накоплены и продолжают образовываться на ряде промышленных производств. Без должного контроля такая ситуация потенциально представляет не меньшую угрозу радиационной безопасности населения страны, чем традиционные радиоактивные отходы.

Первая часть этой проблемы постепенно начинает решаться уже в ближайшие годы включением в существующую систему сбора данных по дозам облучения населения за счет природных источников излучения нового блока, в котором будут представляться сведения об уровнях природного облучения работников этих предприятий. Перспективы решения ее второй части, связанной с производственными отходами с повышенным содержанием природных радионуклидов, пока неопределенны.

Вторая проблема связана с тем, что до настоящего времени определенная часть информации о дозах природного облучения населения не может быть учтена в РБДОПИ и ФБДОПИ. Это обусловлено тем, что данные сведения в радиационно-гигиенических паспортах территорий и в системе СГМ представлялись в обобщенном виде – они не содержат адресов, характеристик зданий и помещений и т. д. Это вполне понятно, поскольку основная цель этих подсистем – характеристика текущей радиационной обстановки в отдельных субъектах и стране в целом, а также анализ связи демографических показателей с факторами среды обитания людей.

В РБДОПИ и ФБДОПИ все данные привязаны к конкретным адресам – населенный пункт, дом, квартира и т. д. Основной целью этих банков данных является не столько оценка текущих доз, сколько постепенное выявление групп жителей, которые подвергаются повышенным или высоким уровням природного облучения. Начиная с 2014 г., основой для сбора сведений по дозам природного облучения населения является отчетная форма № 4-ДОЗ. Для этого создано единое программное обеспечение радиационно-гигиенической паспор-

тизации и ЕСКИД. Все измерения, проводимые с разной целью, будут представляться в едином формате, а сведения для РГПТ будут генерироваться непосредственно из форм № 4-ДОЗ.

В завершение этого раздела интересно задаться вопросом: что нужно для того, чтобы система нормирования по обеспечению радиационной безопасности населения при облучении природными источниками излучения выполняла свою главную целевую функцию – ограничение до приемлемо низкого уровня доз облучения населения? Ответ очевиден и заключается в следующем.

Во-первых, необходимо определить, что для РФ следует принять в качестве приемлемо низкого уровня природного облучения населения. Очевидно, в современных условиях для Российской Федерации суммарные дозы облучения ниже среднего по стране 3,4 мЗв/год практически недостижимы. Поэтому с определенными оговорками в качестве такого уровня вполне приемлемой является годовая эффективная доза облучения населения за счет всех природных источников излучения до 5 мЗв/год. По-видимому, этот уровень облучения и соответствующий ему риск неблагоприятных последствий следует считать социально приемлемыми. Конечно, можно ставить задачу снижения этого уровня, но ее решение может рассматриваться только в очень долгосрочной перспективе, исчисляемой многими десятилетиями. Чтобы запустить в стране механизм снижения уровня природного облучения населения, следует ввести в нормативно-методическую базу регулирования понятия существующего облучения, референтных уровней и оптимизации, как это рекомендовано Публикацией МКРЗ 103 [114]. Поскольку радон является основным источником природного облучения, то механизм снижения уровня природного облучения населения (с учетом введения существующего облучения, референтных уровней и оптимизации) необходимо в оперативном порядке реализовать именно в отношении этого фактора.

Во-вторых, нужна сама система нормирования по обеспечению радиационной безопасности населения при облучении природными источниками излучения, которая учитывала бы реальные уровни природного облучения населения в производственных и коммунальных условиях, а также технические, экономические и иные возможности

их снижения. Так, на отдельных производствах возможности снижения уровней облучения работников до нормативного значения практически отсутствуют. Очевидно, что в таких случаях практически единственным возможным и разумным мероприятием по обеспечению радиационной безопасности работников является не снижение доз их облучения, а сокращение времени работы в условиях данного производства.

В-третьих, нужна информационно-аналитическая система сбора данных о дозах природного облучения населения, которая позволяет выявлять по возможности все объекты строительства (жилые, общественные и производственные здания), а также производства, в которых превышены установленные гигиенические нормативы.

В-четвертых, нужна действенная система надзора за обеспечением радиационной безопасности населения при воздействии природных источников излучения в коммунальных и производственных условиях. Как показано выше, основные проблемы с высокими уровнями природного облучения населения связаны со зданиями старой постройки. Первое десятилетие этого века практически все объекты нового строительства подвергались радиационному контролю перед сдачей в эксплуатацию, поэтому появление зданий с повышенными уровнями ЭРОА изотопов радона было маловероятным. В настоящее время система оценки соответствия зданий и сооружений требованиям санитарных правил и гигиеническим нормативам стала добровольной и во многом надзор за ними ослаблен. Необходимо разработать механизм обязательного представления всеми подрядчиками результатов добровольного декларирования данных, основанных на результатах инструментальных измерений показателей радиационного контроля перед сдачей в эксплуатацию в единую региональную базу данных.

В-пятых, всю систему обеспечения радиационной безопасности населения необходимо заставить работать, используя при этом международные рекомендации ВОЗ, МКРЗ и МАГАТЭ. В стране имеется уникальная система сбора данных, большой массив информации в Региональных и Федеральном банках данных, в том числе и с адресными сведениями о группах населения, подвергающегося высоким уровням облучения за счет природных источников излучения. Необ-

ходимо провести ее реорганизацию в соответствии с предложенными ранее механизмами. Очевидно, что настало время практических действий по разработке и осуществлению мероприятий по снижению облучения этих групп населения.

По-видимому, система мероприятий по снижению уровней облучения населения должна планироваться и осуществляться на национальном уровне в рамках федеральных или государственных программ. Примером тому может быть существовавшая ранее ФЦП «Радон», которая включала целый ряд направлений, в том числе и мероприятия по практическому снижению уровней облучения отдельных групп населения с высокими дозами, а также оценку эффективности защитных мер. Тогда в рамках такой программы система нормативного обеспечения и система сбора данных должны быть важнейшим инструментом как раз для анализа состояния радиационной безопасности и принятия практических решений по основным мероприятиям для снижения уровней и неблагоприятных последствий природного облучения населения.

В заключение отметим, что практически во всех передовых зарубежных странах национальные программы снижения уровней облучения населения за счет природных источников излучения, включающие масштабные исследования по оценке доз облучения, сводятся к определению доз за счет радона в воздухе зданий. Остальные компоненты природного облучения также контролируются и оцениваются, в случае необходимости принимаются меры по ограничению их воздействия на население.

Однако по понятным причинам основное внимание уделяется именно контролю и нормированию содержания радона в воздухе помещений. Практически все значимые эпидемиологические исследования также посвящены изучению последствий облучения населения за счет радона в воздухе помещений. Учитывая, что основной вклад в облучение населения в РФ также вносит радон в зданиях, то, одним из наиболее перспективных направлений оптимизации системы сбора данных о дозах облучения населения за счет природных источников излучения следует рассматривать именно этот фактор и основное внимание уделять ему.

## Литература

1. Sources-to-Effects Assessment for Radon in Homes and Workplaces.// United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.2006 Report to the General Assembly, with scientific annexes. United Nations, New York. – 2009.
2. Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective // World Health Organisation (WHO). – Geneva: WHO Press. – 2009.
3. Риск возникновения рака легкого при облучении радоном и продуктами его распада. Заявление по радону / под ред. *М.В. Жуковского, С.М. Киселева, А.Т. Губина* / пер. Публикации 115 МКРЗ // ICRP. – Москва: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России». – 2013.
4. Руководство по защите от облучения радоном / под ред. *М.В. Жуковского, И.В. Яρμοшенко, С.М. Киселева* / пер. Публикации 126 МКРЗ.// ICRP. – Москва: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России». – 2015.
5. Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation, SSG 32 // IAEA: Vienna. – 2014.
6. Protection against Radon-222 at Home and at Work. ICRP Publication 65. Ann. ICRP 23 (2) // ICRP. – 1993.
7. Council Directive 2013/59/Euratom, OJ L13 // Euratom. – 17.01.2014, p. 1–73.
8. *Tollefsen T.* From the European indoor radon map towards an Atlas of natural radiation / *T. Tollefsen, G. Cinelli, P. Bossew* [et al.] // Radiation Protection Dosimetry. – 2014. Vol. 162, №. 1–2. – P. 129–134.
9. De Cort M. Towards a European Atlas of natural radiation: goal, status and future perspectives / *M. De Cort, V. Gruber, Tollefsen* [et al.] // Radioprotection. – 2011. 46. – P. 737–743.
10. *Dubois G.* An overview of radon surveys in Europe/ *G. Dubois*,// Report EUR 21892. Office for Official Publications of the European Communities. – 2005. URL: [http://rem.jrc.ec.europa.eu/RemWeb/publications/UR\\_RADON.pdf](http://rem.jrc.ec.europa.eu/RemWeb/publications/UR_RADON.pdf).
11. *Dubois G.* First steps towards a European Atlas of natural radiation: status of the European indoor radon map / *G. Dubois, P. Bossew, T. Tollefsen* [et al.] // J. Environ. Radioact. – 2010. 101. – 786–798.

12. *Tollefsen T.* Status of the European indoor radon map / *V. Gruber, P. Bossew, T. Tollefsen* [et al.] // *Radiat. Prot. Dosim.* – 2011. 145(2–3). – P.110–116
13. *Gruber V.* The European indoor radon map and beyond / *V. Gruber, T. Tollefsen, P. Bossew, M. De Cort* // *Carpathian J. Earth Environ. Sci.* – 2013. 8 (2). – P. 169–176.
14. *Gruber V.* The European indoor radon map – questionnaire results and evaluation for quality assurance / *V. Gruber, T. Tollefsen, M. De Cort* // *JRC Scientific and Policy Reports. JRC87017.* – 2013.
15. *Gruber V.* The European map of the geogenic radon potential / *V. Gruber, P. Bossew, M. De Cort* [et al.] // *J. Radiol. Prot.* – 2013. 33 (1). – P. 51–60 (2013).
16. *Baker G.R.* One Geology-Europe. Final Report ECP-2001-GEO-317001 / *G.R. Baker, I. Jackson.* – 2010. URL: [www.onegeology-europe.org](http://www.onegeology-europe.org).
17. *Gruber V.* A first version of a European Geogenic Radon Map (EGRM) // *V. Gruber, P. Bossew, T. Tollefsen* [et al.] // In: *Proceedings of the 11th International Workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping. Czech Geological Survey and Radon.* –2012. ISBN 978-80-7075-789-5. URL: <http://www.radon.eu/workshop2012/>.
18. *Standring W.* et al. Norway's new national radon strategy, Natural radiation, radon, NORM / *W. Standring* [et al.] // *Proceedings of Third European IRPA Congress 2010 June 14–16.* – Helsinki, Finland. – 2010.
19. *Strålevern Rapport 2001:6* (in Norwegian). Indoor radon survey in 114 municipalities. Short presentation of results // *Østerås: Norwegian Radiation Protection Authority.* <http://radon.nrpa.no>. – 2001.
20. *Strand T.* Radon in Norwegian Dwellings / *T. Strand, B.M.R. Green, P.R. Lomas* // *Radiation Protection Dosimetry.* – (1992), 45 (1/4). – P. 503-508.
21. *Strand T.* Indoor Radon Survey in 114 Municipalities. Reports series 2001:6. English summary / *T. Strand, K. Ånestad, L. Ruden* [et al.] // *Norwegian Radiation Protection Authority.* – URL: <http://radon.nrpa.no>. – 2001.

22. *Strand T.* Mapping of Radon Concentrations in 44 Norwegian Municipalities. Reports series 2003:9.English summary / T. Strand, C.L. Jensen, G.B. Ramberg [et al.] // Norwegian Radiation Protection Authority. –2003.
23. *Strand T., Jensen C.L., Stranden, E.* [et al.] Radon Concentrations in the 2000–2003 // Norwegian Housing Stock. – [http:// radon.nrpa.no](http://radon.nrpa.no). – 2005.
24. Strategy for the reduction of radon exposure in Norway. Publication number:I–1144E // Norwegian Ministries, Norwegian Government Administration Services, Distribution Services. – Print: Norwegian Government Administration Services. – URL: <http:// radon.nrpa.no>. – 2010.
25. *Päivi Kurttio* Radon exposure in Finland, Radiation and Nuclear Safety Authority – STUK, FINLAND, Oral presentation // ASN– NRPA Workshop, 2014 October 14. – Paris, France. – 2014.
26. Decree 944/92 by the Ministry of Social Affairs and Health on reference value for indoor radon concentration in dwellings (in Finnish: Sosiaali- ja terveysministeriön päätös asuntojen huoneilman radonpitoisuuden enimmäisarvoista. n: o 944/92) // Ministry of Social Affairs and Health. – Helsinki. – 1992.
27. *Mäkeläinen I., Valmari T., Reisbacka He, et al.* Indoor Radon and Construction Practices in Finnish homes from the 20<sup>th</sup> to the 21<sup>st</sup> century // Third European IRPA Congress, 2010, June 14–16. – Helsinki, Finland. – 2010.
28. *Castren O., Arvela H., Makeläinen I., Voutilainen A.* Indoor radon survey in Finland: Methodology and applications // Radiation Protection Dosimetry. – 1992, 45 (1–4). – P.413–418.
29. *Valmari T., Mäkeläinen I., Arvela H., et al.* National measurement database in radon research in Finland, Radiation and Nuclear Safety Authority-STUK // FINLAND Third European IRPA Congress, 2010 June 14–16. – Helsinki, Finland. – 2010.
30. *Arvela H., Mäkeläinen I., Castrén O.* Otantatutkimus asuntojen radonista Suomessa (Residential Radon Survey in Finland. In Finnish, abstract in English). STUK-A108 // Helsinki: Radiation and Nuclear Safety Authority. – 1993.

31. *Mäkeläinen I., Kinnunen T., Reisbacka H., Valmari T., Arvela H.* Radon suomalaisissa asunnoissa – Otantatutkimus 2006 (Radon in Finnish dwellings – Sample survey 2006. In Finnish, abstract in English). STUK–A242 // Helsinki: Radiation and Nuclear Safety Authority. – 2009.
32. *Voutilainen A., Mäkeläinen I., Pennanen M., et al.* Suomen Radonkartasto–Radon Atlas of Finland. STUK–A148. Helsinki: Oy Edita Ab, 1997 URL: [http://www.stuk.fi/sateilytietoa/sateily\\_ymparistossa/radon/](http://www.stuk.fi/sateilytietoa/sateily_ymparistossa/radon/).
33. *Skeppström K.* Existing strategy and challenges for a national action plan for radon in Sweden, Swedish Radiation Safety Authority, URL: <http://www.ssi.se/> Oral presentation // ASN-NRPA Workshop, 2014 October, 14. – Paris, France. – 2014.
34. *Urban Norlén, Kjell Andersson* Bostadsbeståndets inneklimat, ELIB rapportnr 7, TN: 30, Statens institut för byggnadsforskning. – 1993.
35. *Åkerblom G., Pettersson B., Rosén B.* (1988): A handbook of investigation of the radon situation in areas before building //The Swedish Council for Building Research and the Swedish National Board for Physical Planning and Building. Report R88:1988. Revised edition. – 1990. – 160 P.
36. *Åkerblom G.* (1995): The use of airborne radiometric and exploration survey data and techniques in radon risk mapping in Sweden. Application of uranium exploration data and techniques in environmental studies // Proceedings of a Technical Committee meeting held in Vienna, 912 November 1993. IAEA-TECDOC-827. – 1993. – P.159–158.
37. *Åkerblom G. and Lindgren J.* (1997): Mapping of Ground Water Radon Potential // Uranium exploration data and techniques applied to the preparation of radioelement maps. Proceedings of a Technical Committee meeting held in Vienna, 13–17 May 1996. IAEA–TEC–DOC-980. – 1996.
38. *W. Ringer et al* The Austrian Radon Programme – Past and Future // Proceedings of Third European IRPA Congress, 2010 June 14–16. – Helsinki, Finland. – 2010.
39. Radon in Österreich: Bestandsaufnahme bisheriger Untersuchungen und Konzepte für ein weiteres Vorgehen hinsichtlich eines nationalen

- Radonprogrammes // Forschungsberichte des Bundesministeriums für Gesundheit, Sport und Konsumentenschutz, Sektion III. – 1992.
40. Empfehlung der Strahlenschutzkommission betreffend Richtwerte für die Radonkonzentration in Innenräumen // Radon in Österreich 1993. Forschungsberichte des Bundesministeriums für Gesundheit, Sport und Konsumentenschutz, Sektion III. – 1994.
  41. Radon – Measuring methods and their range of applications // ÖNORM S-5280-1. Österreichisches Normungsinstitut; 2008-05-01.
  42. Radon – Technical precautionary measures in the case of buildings // ÖNORM S-5280-2. – Österreichisches Normungsinstitut; 2003-03-01.
  43. Radon – Remedial measures on buildings // ÖNORM S-5280-3. – Österreichisches Normungsinstitut; 2005-06-01.
  44. *Friedmann H.* Results of the Austrian Radon Project // *Health Phys.* – 2005. vol. 89 (4). – P. 339–348.
  45. *Ringer W.* The Austrian Radon Map, Presentation // IAEA Regional Workshop on Review of Radon Programmes in Europe Member States. – Vienna, Austria; 22–25 April, 2014.
  46. *Ringer W. et al.* Determination of the Radon Potential of a Building by a Controlled Depressurisation Technique (RACODE) // *The Natural Radiation Environment VII*, Eds.: McLaughlin, Simopoulos, Steinhäusler, Elsevier. – 2005. – P. 221–231.
  47. *Maringer F.J., Ringer W., Kaineder H. et al.* Results and Conclusions from the Upper Austrian Radon and Indoor-Pollution Study in Kindergartens and Schools // *Proceedings of 11th International Congress of the International Radiation Protection Association.* – Madrid, 23–28 May, 2004.
  48. *Ringer W., Bernreiter M., Kaineder H., et al.* Radonbelastung in Oberösterreichischen Kindergärten. // *Proceedings 18. ÖSRAD Tagung Konsequenzen der EU-Richtlinie 96/29/EURATOM für die radiologische Umweltüberwachung*, 6. Juni 2002. – Wien, 2002.
  49. *Ringer W., Bernreiter M., Kaineder H., Maringer F.J.* Radon concentrations during working time vs. total average radon concentrations in Austrian kindergartens and schools // *Proceedings of 11th International Congress of the International Radiation Protection Association.* – Madrid, 23–28 May, 2004.

50. Radon in Oberösterreich: Untersuchungen in öö. Amtsgebäuden. Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung Umweltschutz / Strahlenschutz (Eds). – Endbericht; April 2009.
51. *Ringer W., Simader M., Bernreiter M., et al.* Occupational Radiation Exposure in Upper Austrian Water Supplies and Spas // Proceedings of Second European IRPA Congress on Radiation Protection: From Knowledge to Action. – Paris, 15–19. Mai, 2006.
52. *Ringer W., Simader M., Bernreiter, et al.* Mitigation of Three Water Supplies with High Radon Exposure to the Employees // Radiation Protection Dosimetry. – 2008. 130 (1), 26–29.
53. *Хулка И.* Опыт реализации радоновой программы в Чехии // Презентация на рабочем совещании МАГАТЭ, 4–5 февраля. – М., 2014.
54. *Hůlka J., Thomas J.* National Radon Programme: 20 years of experience in Czech Republic// IRPA congress Madrid. – 2004.
55. Radon Program of the Czech Republic 2010–2019–Action Plan (<http://www.suro.cz/en/index.html>).
56. *Davidková J.* National Radon Action Plan of the Czech Republic, 15 years of experiences, Oral presentation // ASN– NRPA Workshop, October 14. – Paris, France. 2014
57. *Pravdová E.* Radon Program of the Czech Republic (project – reality – experience) State Office for Nuclear Safety Czech Republic RADON. – Prague, 2013.
58. *Pacherová P. et al.* Radon database – the statistical evaluation. Radon investigations in the Czech Republic X and the 7<sup>th</sup> International Workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping. – 168 p. ČGS Praha, 2004.
59. *Barnet I., et al.* Radon investigations in the Czech Republic X and the 7<sup>th</sup> International Workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping. – 168 p. ČGS Praha, 2004.
60. National action plan concerning radon 2012-2020 // Swiss Federal Office of Public Health, Radiological Protection Division, Bern. URL: [www.ch-radon.ch](http://www.ch-radon.ch).
61. Swiss Radonprogramme «RAPROS», Report on the results 1987–1991, Bern.

62. *Murith C.* FOPH. The Swiss national radon action plan 2012/2020 Radiation Protection Division standard // HERCA. Workshop, ASN Paris, 30 Sept.
63. Nationales Radonprogramm Schweiz, Umsetzungskonzept 2005-2014 // Institut fuer Politikstudien. – Luzern, 2014.
64. Radiological Protection Ordinance (ORaP), [www.admin.ch/ch/d/rs/c814\\_501](http://www.admin.ch/ch/d/rs/c814_501). 1994.
65. *Chaouch A., et al.* Indoor radon data mining with geostatistical tools: case study with a highly clustered and variable dataset // Proceedings of IAMG 2003, International Association for Mathematical Geology, IAMG 2003 Portsmouth, UK, September 7–12. – 2003.
66. *Kanevski et al.* (2004). Advanced analysis and modelling tools for spatial environmental data. Case study: indoor radon data in Switzerland // Proceedings of EnviroInfo 2004, the 18th International Conference on Informatics for Environmental Protection, Geneva, Switzerland, October 21–23. – 2004.
67. Annual report of the Division of Radiological Protection. Report BAG VS 6.05 3000 d-f-kombi 40 EXT05004 (in German and French). – 2004.
68. *C. Roulet* Radon in the Swiss SIA.180 standard // HERCA Workshop, ASN Paris 30 September. – 2014.
69. Swiss Radon Handbook. Swiss Federal Office of Public Health // Radiological Protection Division Radiological Risk Section. 3003, Bern.
70. *Fennell S., et al.* Radon in Dwellings // The Irish National Radon Survey. RPII-02/1. – 2002.
71. *Fennell S., et al.* Radon exposure in Ireland // International Congress Series. – 2002. 1225: 71–77.
72. *Fenton D.* Development of the Irish Radon Control Strategy, Environmental Protection Agency // HERCA Workshop, ASN Paris 30 September. – 2014.
73. Public consultation on the draft National Radon Control Strategy // Department of the Environment, Community and Local Government, Newtown Road, Wexford ([radationPolicy@envirin.ie](mailto:radationPolicy@envirin.ie)). – 2013.
74. *Gambard J., et al.* Campagne nationale de mesure de l'exposition domestique au radon IPSN-DGS. Bilan et représentation cartographique

- des mesures au 01 Janvier Note technique SEGR/LEADS/00-14 // Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire. – 2000.
75. *Baysson H., et al.* Seasonal correction for estimating radon exposure in dwellings in France // Radiation Protection Dosimetry. – 2003. 104 (3): 245-252.
  76. *Billon S., et al.* Evaluation de l'exposition de la population française à la radioactivité naturelle // Radioprotection. – 2004. 39:213–232,
  77. *Billon et al.* French population exposure to radon, terrestrial gamma and cosmic rays // Radiation Protection Dosimetry. – 2005. 113 (3): 314–320.
  78. *Ielsch G., Haristoy D.* Mise au point d'une méthodologie permettant l'élaboration d'un outil cartographique prédictif en vue d'identifier les zones potentiellement exposées à de fortes concentrations de radon (2 Volumes). Programme Environnement et Santé 1997 // Rapport IPSN-BRGM Réf. IPSN/DPRE/SERGD RT 01-05. – 2001.
  79. *Ielsch G.* Méthodologie de cartographie prédictive du potentiel d'exhalation du radon à la surface des sols: bilan des projets de recherche et validation complémentaire // Rapport IRSN/DEI-SARG 03-02, October. – 2003.
  80. *Code J. and Dechaux E.* The French National Action Plan 2011-2015 for the management of radon-related risks // ASN. HERCA Workshop, ASN Paris 30 September. – 2014.
  81. *Rannou A. et al.* High radon levels in French homes (Bessines-Limousin), IRSN // HERCA Workshop, ASN Paris 30 September. – 2014.
  82. The French National Action Plan 2011–2015 for the management of radon-related risks // Report ASN. – Paris 15 November 2011. URL: [www.asn.fr](http://www.asn.fr).
  83. *Poffijn A., Eggermont G., Hallez S., et al.* Radon in Belgium: Mapping and Mitigation in the Affected Area of Visé // Radiation Protection Dosimetry. – 1994. 56 (1–4): 77-80. URL: <http://www.fanc.fgov.be/fr/radnat.htm>.
  84. *Tondeur F., Zhu H.C., Charlet J.M., Gerardy I., Perreaux R.* Radon from the subsoil to the dwelling in southern Belgium // Environment International. – 1996. 22 (1): S535-S543.
  85. *Zhu H.C., Charlet J.M., Tondeur F. et al.* Geological controls to the indoor radon distribution in southern Belgium // The Science of the Total Environment. – 1998. 220 (2–3): 195-214.

86. *Zhu H.C., Charlet J.M., Poffijn A.* Radon risk mapping in southern Belgium: an application of geostatistical and GIS techniques // *The Science of the Total Environment.* – 2001. 272 (1–3): 203–210.
87. *Vanmarcke H., Mol H., Paridaens J. et al.* Eggermont (2004). Exposure of the Belgian Population to Ionizing Radiation // *Proceedings of the IRPA-11 Congress.* – Madrid, May, 2004.
88. *Dehandschuter B., Sonk M.* The Belgian radon action plan, Health and Environment, Federal Agency for Nuclear Control. // *HERCA Workshop, ASN Paris 30 September.* – 2014.
89. *Wrixon A. et al.* Natural radiation exposure in UK dwellings // *NRPB R-190.* – 1988.
90. *Miles J. et al.* Radon Affected Areas: Scotland and Northern Ireland// *Doc. NRPB, 4, No. 6.* – 1993.
91. *Miles J.* Mapping radon-prone areas by lognormal modelling of house radon data // *Health Phys.* – 1998. 74: 370-378.
92. *Miles J.* Development of maps of radon-prone areas using radon measurements in houses // *Journal of Hazardous Materials.* – 1998. 61:53-58.
93. *Green B.* Radon in dwellings in Northern Ireland: Atlas and 1999. Review / *B. Green [et al.]* // *NRPB-R308.* – 1999.
94. *Green B.* Radon Atlas of England and Wales / *B. Green [et al.]* // *NRPB-W26.* – 2002.
95. *Miles J., C.H., Appleton. J.* Mapping variation in radon potential both between and within geological units // *J. of Radiological Protection.* – 2005. 25: 257–276.
96. *McCull N.* Radon in UK homes: Progress and Plans, Public Health England (PHE) Centre for Radiation, Chemical and Environmental Hazards // *HERCA Workshop, ASN Paris 30 September.* – 2014.
97. *Long B.* US Federal Radon Action Plan, Center for Radon and Air Toxics, Office of Air and Radiation // *US EPA, HERCA Workshop, ASN Paris, 30 September.* – 2014. URL: [www.epa.gov/radon](http://www.epa.gov/radon).
98. *McBurney R.* How the U.S. Developed a National Radon Action Plan: Lesson Learned and Ideas to Consider (State and NGO Activities), Conference of Radiation Control Program // *HERCA. ASN Paris, 30 September.* – 2014.

99. *Thompson P. et al.* Canadian radon strategy and action, Canadian Nuclear Safety Commission, Canadian provinces and territories, Health Canada. Oral presentation// HERCA Workshop, ASN Paris, 30 September. – 2014.
100. *Тарасов С.И.* Исследование и гигиеническая оценка уровней радиационного воздействия на население РСФСР естественных радионуклидов и космического излучения. Отчет / *С.И. Тарасов, Э.М. Крисюк, Д.К. Попов* [и др.]. – Л., 1980.
101. *Карпов В.И.* Фотонное излучение естественных радионуклидов / *В.И. Карпов, Э.М. Крисюк*. – М., 1979.
102. Временные методические указания, по радиационно-гигиенической оценке, полезных ископаемых при производстве геолого-разведочных работ на месторождениях строительных материалов. – Казань, 1986.
103. *Крисюк Э.М.* Проведение радиационно-гигиенического обследования жилых и общественных зданий / *Э.М. Крисюк, М.В. Терентьев, И.П. Стамат* [и др.] // Методические указания МУ 2.6.1.715–98. Утверждены 24.08.1998 г. – СПб., 1998.
104. *Королева Н.А.* Аппаратурно-методические разработки и метрологическое обеспечение средств измерений объемной активности радона и дочерних продуктов распада в воздухе помещений / *Н.А. Королева, И.П. Стамат, М.В. Терентьев* // Радиационная гигиена: сб. науч. трудов. – СПб., 2006. – С. 52–60.
105. *Маренный А.М.* Оценка облучения населения России радоном (метод и результаты) / *А.М. Маренный, М.Н. Савкин, С.М. Шинкарев* // Медицинская радиология и медицинская безопасность. – 1999. Т. 44, № 6. – С. 37–43.
106. *Крисюк Э.М.* Организация и проведение выборочного обследования уровней облучения населения за счет радона в жилых домах / *Э.М. Крисюк, И.П. Стамат* // АНРИ. – 1996/97. № 3. – С. 25–30.
107. Ограничение облучения населения от природных источников ионизирующего излучения // Временные критерии для принятия решения и организации контроля. № 43-10/796 от 5.12.1990 г. – М.; 1990.
108. Principles for Limiting Exposure of the Public to Natural Sources of Radiation. ICRP Publication 39. Ann. ICRP 14 (1) // ICRP. – 1984.

109. *Стамат И.П.* Система гигиенических требований по ограничению облучения населения Российской Федерации природными источниками излучения / *И.П. Стамат* // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук. – Спб., 2012.
110. Защита от радона-222 в жилых зданиях и на рабочих местах // Публикация 65 МКРЗ. Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1995.
111. Нормы радиационной безопасности (НРБ-96) // Гигиенические нормативы ГН 2.6.1.054-96. – М., 1996.
112. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99) // Гигиенические нормативы СП 2.6.1.758-99. – М., 1999.
113. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) // Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утверждены 07.08.2009 г. М.: 2009.
114. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер с англ. / Под общей ред. М. Ф. Киселёва и Н. К. Шандалы // ICRP. – М.: Изд. ООО ПКФ «Алана». – 2009.
115. Zhi Zhongji and the Writing Group of the Nationwide Survey of Environmental Radioactivity Level in China. Survey of environmental natural penetrating radiation level in China. (1983–1990) // *Radiat. Prot.* – Taiyuan. 1992. № 2. – P. 120–122.
116. *Hughes J.S.* National Radiation Protection Board: Report NRPB-R 173 / *J.S. Hughes, G.C. Raberts.* – London, 1984. – P. 237–344.
117. European Radon Research and Industry Collaboration Concerted Action. // European Commission Contract № FIRI-CT-2001-20142. – Ireland: Radiological Protection Institute of Ireland. – 2005.
118. *Fisher E.L., Field R.W. Smith B.J. at al.* Spatial variation of residential radon concentrations: the Iowa radon lung cancer study. // *Health Physics.* – 1998. – № 5. – P. 506–513.
119. *Крисяк Э.М.* Кризис концепции регламентации облучения населения. Существует ли он? / *Э.М. Крисяк* // АНРИ. – 1998. № 1 (12). – С. 26–31.
120. О радиационной безопасности населения // Федеральный закон № 3-ФЗ от 09.01.1996 г.
121. Порядок заполнения и ведения радиационно-гигиенических паспортов организаций и территорий // Сборник официальных до-

- кументов «Радиационно-гигиеническая паспортизация организаций и территорий». – СПб, 1998. – с. 17–61.
122. *Стамат И.П.* К вопросу о состоянии радиационной обстановки в г. Балеи Читинской области / *И.П. Стамат, В.А. Венков, В.И. Игнатьев* [и др.] // Радиационная гигиена: сб. науч. трудов СПб НИИРГ. СПб., 2004. С. 78–82.
123. *Венков В.А.* Оценка доз облучения жителей Республики Алтай за счет содержания радона в воздухе зданий / *В.А. Венков, А.В. Световидов, И.П. Стамат* [и др.] // Гигиенические аспекты обеспечения радиационной безопасности населения на территориях с повышенным уровнем радиации: материалы междунар. науч. практ. конф. – СПб., 2008. – С. 30–32.
124. *Венков В.А.* Обобщение имеющихся данных и дополнительное обследование, и оценка доз облучения жителей г. Балеи Читинской области за счет природных радионуклидов. Отчет / *В.А. Венков, Т.А. Кормановская, И.П. Стамат* [и др.]. – СПб, 2006.
125. *Стамат И.П.* Уровни облучения жителей Еврейской автономной области за счет радона в воздухе зданий / *И.П. Стамат, Д.В. Кононенко, А.В. Световидов* [и др.] // Гигиенические аспекты обеспечения радиационной безопасности населения на территориях с повышенным уровнем радиации: материалы междунар. науч. практ. конф. – СПб., 2008. – С. 133–135.
126. *Akerblom G.* Radon in Dwellings in the Republic of Kalmykia Results from the National Radon Survey 2006-2007 / *G. Akerblom, O. German, I. Stamat* [et.al.] // Report SSI number: 2009:04 ISSN: 2000-0456. – 2009.
127. *Губин А.Т.* Обследование территорий, обслуживаемых ФМБА России, на содержание радона в помещениях / *А.Т. Губин, А.М. Маренный, В.А. Сакович* [и др.] // Медицина экстремальных ситуаций, 2012, № 4 (42), С. 77–88.
128. *Маренный А.М.* Проведение обследований зданий различного назначения на содержание радона на территориях, обслуживаемых ФМБА России / *А.М. Маренный, В.И. Астафуров, А.Т. Губин* [и др.] // Радиационная гигиена. – 2015. Т. 8 № 1.

129. *Маренный А.М.* Обследование города Краснокаменск на содержание радона в помещениях / *А.М. Маренный, С.М. Киселев, А.В. Тутов* [и др.] // Радиационная гигиена. – 2013.Т. 6 № 3.
130. *Marenyy A.M.* Results of radon concentration measurements in some regions of Russia / *A.M. Marenyy, N.A. Nefedov, A.S. Vorozhtsov* // Radiatijon Measurements. – 1995, v.25, No1-4. – p.649-653.
131. *Маренный А.М.* Сезонные измерения средней объемной активности радона в помещениях г. Лермонтов / *А.М. Маренный, Н.А. Нефедов, А.С. Ворожцов, С.П. Верейко, П.Ф. Кокорев* // Материалы конференции “Практика защиты населения от облучения радоном”, 1996, с.30-31.
132. *Маренный А.М.* Средняя объемная активность радона в жилищах районов Оренбургской области / *А.М. Маренный, Н.А. Мешков, Н.А. Нефедов, А.С. Ворожцов, А.М. Русанов, Н.Н. Верещагин* // Материалы конференции «Практика защиты населения от облучения радоном». – 1996. – с.34.
133. *V.P. Borisov, A.M. Marenyy, L.P. Saldan* Radon in dwellings in Altai region of Russia // IRPA Regional Congress on Radiation Protection in Central Europe. – Dubrovnik, Groatia, Vfe 20-25, 2001
134. *A.M. Marenyy, S.M. Shinkarev, A.V. Penezhev, A.V. Frolova, Yu.A. Morozov, S.E. Okhrimenko, M.N. Savkin, M. Hoshi* Assessment of exposure to the population of Moscow from natural sources of radiation. In: High Levels of Natural Radiation and Radon Areas: Radiation Doses and Health Effects. Proceedings of the 6th International Conference on high levels of natural radiation and radon areas, held in Osaka, Japan September 6-10, 2004. Eds.: *T. Sugahara, H. Morishima, M. Sohrabi, Y. Sasaki, I. Hayata, S. Akiba*. Elsevier, Amsterdam. – pp 356-357. – 2005.
135. *Маренный А.М.* Скрининговые исследования содержания радона в помещениях населенных пунктов / *А.М. Маренный* // В сб. «Гигиенические аспекты обеспечения радиационной безопасности населения на территориях с повышенным уровнем радиации». – Санкт-Петербург, 2008. – с. 99-101.
136. *Маренный А.М.* Интегральные измерения средней объемной активности радона в помещениях населенных пунктов Челябинской области / *А.М. Маренный, Н.М. Андреев, В.И. Астафуров* [и др.] // В сб. тезисов конференции «Актуальные вопросы радиационной гигиены». – Санкт-Петербург, 2010. – с. 98-99.

137. *Zhukovsky M., Yarmoshenko I.* Radon Survey in the Ural Region of Russia: Results and Analysis / *M. Zhukovsky, I. Yarmoshenko* // Radiation Protection Management. – 1998. № 2. – P. 34–42.
138. Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка земельных участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения в части обеспечения радиационной безопасности // Методические указания МУ 2.6.1. 2398–08. Утверждены 02.07.2008 г. – М.: 2009.
139. Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после окончания их строительства, капитального ремонта, реконструкции по показателям радиационной безопасности // Методические указания МУ 2.6.1.2838-11. Утверждены 28.01.2011 г. – М: 2011.
140. О санитарно-эпидемиологическом благополучии: Федеральный закон Российской Федерации № 52-ФЗ от 30.03.1999 г. Принят Государственной Думой 12 марта 1999 г.
141. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99) // СП 2.6.1.799-99 от 27.12.1999 г. – М. – 2000.
142. Градостроительный кодекс Российской Федерации: Федеральный закон Российской Федерации № 190-ФЗ от 29.12.2004 г. Принят Государственной Думой 22 декабря 2004 г.
143. *Стамат И.П.* Проблемы радиационной безопасности объектов строительства в современных условиях / *И.П. Стамат* // Актуальные вопросы радиационной гигиены: материалы науч. практ. конф. с междунар. участием. – СПб., 2010. – С. 129–131.
144. *Соловьев М.Ю.* Содержание радона в воздухе вновь построенных и эксплуатируемых зданий в Ростовской области / *М.Ю. Соловьев, М.В. Калинина, И.П. Стамат* // Радиационная гигиена. – 2010. Т. 3, № 2. – С. 62–66.
145. Дозы ионизирующего излучения у населения Российской Федерации в 1999 году. Справочник / под ред. *П.В. Рамзаева*. – СПб., 2001.
146. Информационный сборник Дозы облучения населения Российской Федерации в 2010 году / *Барышков Н.К., Братилова А.А., Кормановская Т.А. и др.* – СПб, 2011.

147. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: Федеральный закон Российской Федерации № 384-ФЗ от 30.12.2009 г. Принят Государственной Думой 23 декабря 2009 г. Москва, 30 декабря 2009 г.
148. *Стамат И.П.* О необходимости радиационного обследования зданий после окончания строительства, капитального ремонта или реконструкции / *И.П. Стамат, Г.А. Горский, А.В. Еремин* // Радиационная гигиена. – 2010. Т. 3, № 1. – С. 28–32.
149. *Горский Г.А.* К оценке эффективности предупредительного надзора за обеспечением радиационной безопасности населения при облучении природными источниками ионизирующего излучения / *Г.А. Горский, И.П. Стамат* // Радиационная гигиена. – 2008. Т. 1, № 3. – С. 41–45.
150. *Онищенко Г.Г.* Радиационная обстановка на территории РФ по результатам радиационно-гигиенической паспортизации в 2007 г. / *Г.Г. Онищенко* // Радиационная гигиена. – 2008. Т.1, № 4. – С. 5-9.
151. *Стамат И.П.* Радиационная безопасность населения России при облучении природными источниками ионизирующего излучения: современное состояние, направления развития и оптимизации / *И.П. Стамат, Т.А. Кормановская, Г.А. Горский* // Радиационная гигиена. – 2015. Т. 8, № 2. – С. 64–72.
152. *Лисаченко Э.П.* Радиационно-гигиеническая оценка современного производства керамики / *Э.П. Лисаченко, И.П. Стамат, И.Г. Матвеева* // Радиационная гигиена. – 2009. Т. 2. № 2. – С. 64–72.
153. *Стамат И.П.* Обоснование к введению нормирования содержания радионуклидов в питьевой воде по взрослому населению / *И.П. Стамат, И.К. Романович, Г.А. Горский* // Радиационная гигиена. – 2009. Т. 2, № 3. – С. 20–26.
154. *Стамат И.П.* Организация и проведение комплексного радиационно-гигиенического обследования системы водоснабжения, г. Тверь. Отчет / *И.П. Стамат, В.А. Венков* [и др.]. – Спб., 2007.
155. *Романович И.К., Кадука М.В., Гончарова Ю.Н. и др.* Обоснованию числового значения критерия предварительной оценки качества питьевой воды по удельной суммарной альфа-активности. // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 3, С. 11–15.

156. *Стамат И.П.* Требования по ограничению облучения населения природными источниками излучения в производственных условиях / *И.П. Стамат, И.К. Романович* // Радиационная гигиена. – 2010. Т. 3, № 3. – С. 10–14.
157. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010) // Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. – 2010.
158. Единый перечень товаров, подлежащих санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю) на таможенной границе и таможенной территории таможенного союза // Утвержден Решением Комиссии таможенного союза от 28 мая 2010 г. № 299. – 2010.
159. *Стамат И.П.* Проблемы радиационной безопасности объектов строительства в современных условиях / *Стамат И.П.* // Сб. тезисов науч. практ. конф. Актуальные вопросы радиационной гигиены, Санкт-Петербург, 7–9 июня 2010 г. – Спб., 2010. – С. 129–131.
160. Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения // Санитарные правила СанПиН 2.6.1.2800-10. – М., 2011.
161. Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения // СП 2.6.1.1292-03. – М.: 2003.
162. *Королева Н.А.* Уровни облучения природными источниками излучения работников подземных предприятий неурановой промышленности / *Н.А. Королева, И.П. Стамат, М.В. Терентьев* [и др.] // Радиационная гигиена. – 2008. Т. 1, № 4. – С. 26–31.
163. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation // UNSCEAR Report to the General Assembly with Scientific Annexes, Vol. I: Sources. – UN, NY, 2000.
164. *Стамат И.П.* Анализ сведений о дозах внешнего терригенного облучения населения Российской Федерации в коммунальных условиях / *И.П. Стамат, Д.В. Кононенко, Т.А. Кормановская* [и др.] // Радиационная гигиена. – 2015. Т. 8, № 3. – С. 33–46.
165. *Григорьев А.И.* Проблемы вычитания фона при индивидуальном дозиметрическом контроле и радиационном контроле на откры-

- той местности / *А.И. Григорьев, Л.В. Панкратов* // Радиационная гигиена. – 2011. Т. 4, № 4. – С. 42–48.
166. *Крисяк Э.М.* Уровни и последствия облучения населения / *Э.М. Крисяк* // АНРИ. – 2002. № 1 (28). – С. 4–13.
167. *Ярмошенко И.В.* Проблемы оптимизации защиты от радона и введения референтного уровня в Российской Федерации / *И.В. Ярмошенко, А.Д. Онищенко, М.В. Жуковский* // Радиационная гигиена. – 2014. Т. 7, № 4. – С. 67–71.
168. *Кормановская Т.А.* Оценка значений объемной активности радона в зданиях с учетом географических и климатических характеристик территории субъектов Федерации / *Т.А. Кормановская, Д.В. Кононенко, И.П. Стамат [и др.]* // Роль, проблемы и задачи радиационно-гигиенической паспортизации в обеспечении радиационной безопасности населения: сб. материалов науч.-практ. конф. – СПб., 2005. – С. 24–29.
169. *Стамат И.П.* Обоснование к введению нормирования содержания радионуклидов в питьевой воде по взрослому населению / *И.П. Стамат, И.К. Романович, Г.А. Горский* // Радиационная гигиена. – 2009. Т. 2, № 3. – С. 20–25.
170. Об оценке радиационной безопасности питьевой воды» // Письмо Роспотребнадзора № 01/15280-0-32 от 26.10.2010 г. – 2010.
171. *Романович И.К.* Совершенствование гигиенических требований по ограничению облучения населения за счет природных источников излучения / *И.К. Романович, И.П. Стамат* // Радиационная гигиена. – 2009. Т. 2, № 3. – С. 15–19.
172. *Горский А.А.* Особенности формирования уровней облучения работников в производственных условиях / *А.А. Горский, И.П. Стамат* // Здоровье населения и среда обитания. – 2011. № 4 (217). – С. 10–14.
173. *Жуковский М.В.* Современные подходы к нормированию облучения радоном и анализ последствий их применения в России / *М.В. Жуковский, И.В. Ярмошенко, С.М. Киселев* // АНРИ. – 2011. Т. 67. № 4.– с.18–25.
174. Организация и проведение мероприятий по снижению содержания изотопов радона в помещениях жилых и общественных зданий и сооружений // Методические Рекомендации. МР 35-14 от 20.03.2014 Утверждены ФМБА России. – 2014.

## **Национальный план действий (Чешская Республика)**

*(сокращенный вариант)*

Настоящий программный документ имеет основной целью содействие, с помощью хорошо продуманных и скоординированных мер, сокращению числа радон-индуцированных смертей от рака легкого. Для достижения этой цели предусматривается решение следующих задач:

Постоянная, регулярно обновляемая, инновационная, понятная, доступная и мотивирующая деятельность по общему и целевому информированию жителей для осознания ими риска для здоровья, вызванного естественной радиацией, а также возможностей профилактики и мер по снижению рисков, связанных с повышенным облучением, наряду с поддержкой интересов жителей о сохранении качества жилья.

Использование существующей правовой базы и обеспечение по мере необходимости ее обновления, а также организация деятельности специалистов по внутриведомственной координации постоянного и эффективного контроля облучения жителей природными источниками, если оно превышает установленные уровни, а также осуществление превентивных мероприятий для этих жителей.

Организация государственной поддержки (в том числе инспектирующих систем) в области измерения и оценки облучения радоном.

Организация государственной поддержки (в том числе инспектирующих систем) в отношении ситуаций с неприемлемо высоким уровнем естественной радиации.

Разработка системы выявления (выбора) районов, которым должно быть уделено особое внимание с точки зрения радона.

### **Инструменты для достижения целей национального плана действий**

Регулярное обновление правовых актов ЧР в свете новых выводов о рисках для здоровья, вызванных естественной радиацией, с учетом изменений в законодательстве ЕС, а также обеспече-

ние постоянной эффективности реализации национального плана действий.

Создание общих и целевых стратегий осведомленности.

Обновление методической документации для измерения и оценки естественной радиации.

Обновление административных и технологических процедур для оптимального решения проблем, связанных со случаями неприемлемо высокой естественной радиации.

Определение индикаторов повышенной концентрации радона в недрах.

### **Целевая группа национального плана действий**

Целевая группа – это все жители страны, поскольку все они потенциально подвержены риску повышенного природного облучения. Однако среди них, в первую очередь, следует выделить строителей новых квартир на территориях с повышенным радоновым риском, а также людей, проживающих в старых домах с повышенной концентрацией радона. Кроме того, в целевую группу должны быть включены ассоциативно вовлеченные коллективы. Это работники местных органов власти и государственного управления, осуществляющие деятельность в определенных областях (работники строительных органов, специалисты по обследованию зданий офисов, проектировщики и поставщики услуг в сфере корректирующих и превентивных мер).

### **Структура национального плана действий включает:**

стратегию осведомленности;

превентивную радоновую стратегию;

стратегию регулирования существующего облучения;

квалифицированную научно-техническую поддержку по выполнению задач национального плана действий.

**Стратегия осведомленности** имеет целью информирование широкой общественности, а также отдельных групп населения и профессионалов, которых непосредственно касаются разделы национального плана действий. Для достижения этой цели предусмотрено решение четырех задач:

**Задача 1.** Подготовка и обработка материалов текущей информации. В рамках этой задачи имеется две подзадачи.

*Подзадача 1.1.* Предоставление интегрированных информационных материалов для общественности, а также целевых групп и публикация их в Интернете. Ответственные: Государственное управление ядерной безопасности, Министерство регионального развития.

Обеспечение доступности информации о методах, технологических процедурах, технических стандартах, геологических документах, а также компаниях, предоставляющих измерения через Интернет или печатные издания. Ответственные: Государственное управление ядерной безопасности, Министерство экологии, Министерство регионального развития, Министерство сельского хозяйства, Министерство промышленности и торговли.

Подготовка поддерживающих документов для других категорий лиц, которые участвуют в предоставлении информации (региональные и местные органы власти, строительные ведомства) для прямой передачи информации жителям. Ответственные: Государственное управление по ядерной безопасности, Министерства регионального развития.

*Подзадача 1.2.* Просвещение населения (школьные уроки) и профессиональной общественности (врачи, проектировщики, агенты по недвижимости, сотрудники региональных, местных и строительных органов). В рамках этой задачи осуществляется:

- подготовка материалов для обучения (ответственные: Государственное управление ядерной безопасности, Министерство регионального развития, Министерство здравоохранения);
- чтение лекций и проведение тренинговых сессий в сотрудничестве со специалистами юридических контор (ответственные: Государственное управление ядерной безопасности);
- проведение семинаров (ответственные: Государственное управление ядерной безопасности, Министерство регионального развития).

**Задача 2.** Координация деятельности национальной информационной кампании, а также других ограниченных во времени одноразовых или повторяющихся мероприятий, мотивирующих жителей к заинтересованности в решении радоновой проблемы. Поддержка информационных кампаний регионального и местного уровня. Проведение целевых мероприятий в зонах повышенной концентрации радона в геологических недрах. Проведение недели профилактики радона. Оценка эффективности деятельности национальной информационной кампании. В рамках этой задачи имеется две подзадачи.

*Подзадача 2.1.* Обработка информационных материалов для использования в СМИ.

*Подзадача 2.2.* Поддержка мероприятий, таких как «хорошая практика – здоровый дом с достаточно низким уровнем облучения» (выбор изоляционных и строительных материалов, снабжение водой). Ответственные: Государственное управление ядерной безопасности.

**Задача 3.** Поддержание веб-сайта, касающегося радоновой программы в Чешской Республике, включая возможность прямого общения с экспертами. Ответственные: Государственное управление ядерной безопасности.

**Задача 4.** Составление мотивационной программы для вовлечения региональных и местных органов власти.

Проведение на долгосрочной основе адресных информационных кампаний на региональном уровне в интересах муниципалитетов, жителей, специалистов, предоставление информации о проблеме радона через их собственные веб-сайты для поддержки обучения в школах, медицинских учреждениях и государственных управлениях, а также долгосрочного мониторинга эффективности программы на региональном уровне. Развитие заинтересованности муниципалитетов в активном использовании подготовленных материалов и консультациях со специалистами. Ответственные: Государственное управление ядерной безопасности, Министерство регионального развития в сотрудничестве с региональными органами власти.

**Превентивная радоновая стратегия** относится, в основном, к вновь строящимся зданиям с помещениями для проживания и пребывания людей. Она имеет целью осуществление профилактических

антирадоновых мероприятий при строительстве зданий, обеспечивающих такой низкий уровень естественной радиации в помещении, который реально достижим с учетом экономических и социальных аспектов, а также достижение уверенности жителей в том, что референтный уровень концентрации радона в 200 Бк/м<sup>3</sup> для проектируемых и строящихся зданий не превышен. Для достижения этой цели предусмотрено решение трех задач:

**Задача 1.** Обновление комплекса законодательной базы в области превентивной стратегии защиты от радона для вновь строящихся зданий. Ответственные: Государственное управление ядерной безопасности, Министерство регионального развития.

**Задача 2.** Обеспечение стандартизации процедур и контроля качества в следующих областях:

- измерение естественной радиации в зданиях и интерпретация результатов. Ответственные: Государственное управление ядерной безопасности, Министерство охраны окружающей среды;
- строительный менеджмент (унифицированная практика строительных управлений). Ответственные: Министерство регионального развития.

**Задача 3.** Регулярный анализ уровня достижений в реализации превентивной стратегии на национальном уровне, оценка эффективности программы в пятилетний период, меры по повышению эффективности в достижении запланированных целей. Ответственные: Государственное управление ядерной безопасности.

**Стратегия регулирования существующего облучения** нацелена на постепенное сокращение количества существующих квартир и зданий общественного назначения, в которых референтный уровень концентрации радона в 400 Бк/м<sup>3</sup> превышен. На основе измерения концентрации радона необходимо выявить квартиры с повышенной концентрацией радона для передачи информации о результатах измерений их собственникам и, в случае превышения референтного уровня, проинформировать их о необходимости и возможности реализации корректирующих действий. Для достижения этой цели предусмотрено решение пяти задач:

**Задача 1.** Обеспечение возможности качественного измерения для поиска зданий (особенно квартир) с повышенной концентрацией радона в сотрудничестве с местными органами власти или строительными организациями. Содействие возрастанию активного интереса собственников к проведению измерений. Параллельное развитие практики осуществления измерений как коммерческим способом, так и при государственной поддержке. В последнем случае детекторы должны предоставляться жителям либо непосредственно Государственным управлением ядерной безопасности, либо Национальным институтом радиационной защиты или другими государственными органами, например, строительными управлениями. Ответственные: Государственное управление ядерной безопасности, Министерство регионального развития.

**Задача 2.** Поддержка владельцев зданий, в которых референтный уровень концентрации радона превышен, и которые заинтересованы в проведении антирадоновых защитных мероприятий самостоятельно за счет собственных средств без финансовых субсидий. Эта поддержка состоит в обеспечении доступности информации о вариантах строительных работ по смягчению последствий, типам измерений, функциональных технологиях и т.д. Ответственные: Государственное управление ядерной безопасности, Министерство регионального развития, региональные органы власти.

**Задача 3.** Обновление нормативно-правовой базы (критерии и правила), которая определяет сроки и условия предоставления государственных субсидий жителям, проживающим в квартирах с высокой концентрацией радона, для осуществления корректирующих действий. Утверждение правил проверки целевого использования государственных субсидий. Обеспечение доступности сведений о функциональных технологиях восстановительных мер, подготовленных на основе новейших научных и специализированных достижений. Ответственные: Государственное управление по ядерной безопасности, Министерство финансов, региональные органы власти.

**Задача 4.** Обновление нормативно-правовой базы, которая устанавливает условия предоставления государственных субсидий жителям для дезактивации питьевой воды в случае превышения пределов содержания радионуклидов, установленных Указом № 307/2002. Опре-

деление правил проверки целевого использования государственных субсидий. Обеспечение доступности сведений о функциональных технологиях в пределах своей компетенции. Ответственные: Государственное управление ядерной безопасности, Министерство финансов, Министерство сельского хозяйства, региональные органы власти.

**Задача 5.** Обеспечение системы независимого контроля изменений после применения восстановительных мер. Ответственные: Государственное управление ядерной безопасности.

**Задача 6.** Сбор подтверждающих документов и регулярный долгосрочный анализ эффективности выполнения программы на национальном уровне, выявление слабых мест. Оценка мероприятий по повышению эффективности и достижению запланированных целей за пятилетний период. Ответственные: Государственное управления ядерной безопасности.

**Квалифицированная научно-техническая поддержка по выполнению задач национального плана действий** имеет своей целью организовать исследования по отдельным направлениям, которые связаны с выполнением задач национального плана действий, направленных на достижение всех его целей. Результаты отдельных проектов должны содействовать качеству выполнения национального плана действий и повышению уровня знаний в данной области. Координация научной деятельности является задачей соответствующих департаментов и не должна являться предметом рассмотрения в рамках национального плана действий. Предложено сфокусировать внимание на семи специализированных направлениях исследований, связанных с реализацией плана:

*Направление 1.* Сбор данных о воздействии радона, рисках для здоровья, методах предотвращения и уменьшения эффекта воздействия радиоактивного газа и оценках их эффективности. Заказчик – Государственное управление ядерной безопасности.

*Направление 2.* Развитие измерительных и диагностических методов для оценки уровней облучения населения радоном в зданиях. Заказчик – Государственное управление ядерной безопасности.

*Направление 3.* Развитие новых технологий противорадионной защиты и оценка их эффективности. Заказчики – Министерство промышленности и торговли, Государственное управление ядерной безопасности.

*Направление 4.* Разработка методологии определения радона в зависимости от параметров здания. Заказчики – Министерство промышленности и торговли, Государственное управление ядерной безопасности.

*Направление 5.* Развитие геофизических методов для оценки радонового риска. Заказчик – Министерство охраны окружающей среды.

*Направление 6.* Разработка и совершенствование методов обработки картографических источников для обновления и уточнения прогнозных карт радонового риска на территории ЧР. Заказчики – Министерство охраны окружающей среды, Государственное управление ядерной безопасности

*Направление 7.* Совершенствование технологий для снижения радона в источниках водоснабжения. Заказчики – Государственное управление ядерной безопасности, Министерство сельского хозяйства.

*Приложение 2.*

## **Национальный план действия (Франция)**

*(сокращенный вариант)*

**Основные направления национального плана действий Франции представлены в следующей таблице:**

<b>Направление 1. Формирование политики в сфере управления радоновым риском в существующих зданиях, предназначенных для жилья</b>	
<b>Действия</b>	<b>№ карты действий</b>
Подвести итог программы, относящейся к измерению и ослаблению воздействия радона в частных жилых помещениях в регионе Лимузен	1
Разработать нормативные документы, определяющие способы применения статьи L.1333-10 CSP (Кодекс о здравоохранении) в редакции закона HPST	2

Провести апробацию механизма сопровождения нового нормирования в трех пилотных зонах	3
Разработать «комплекты радон», предназначенные для проведения измерений в жилом помещении	4
Создать руководство, предназначенное для административно-территориальных образований, по принятию решений для управления риском, связанным с радоном	5
Организовать аттестацию новых измерительных устройств	6
Провести оценку проблематики «жилое помещение, радон и отработанные рудники»	7
<b>Направление 2. Внедрить нормирование для новых зданий</b>	
<b>Действия</b>	<b>№ карты действий</b>
Внедрить нормативные инструменты, относящиеся к правилам строительства новых зданий	8
Внедрить механизм сопровождения нормирования	9
Внедрить инструменты оценки систем предупредительных мер для защиты от радона в новых зданиях	10
<b>Направление 3. Обеспечить контроль регулирования облучения радоном в общественных зданиях и на рабочих местах</b>	
<b>Действия</b>	<b>№ карты действий</b>
Откорректировать рамочное соглашение о сотрудничестве между Генеральной дирекцией по здравоохранению (DGS) и Государственным органом по ядерной безопасности (ASN) и разработать типовое соглашение о сотрудничестве между региональным агентством здравоохранения (ARS) и подразделениями ASN.	11

Продолжать контролировать организации, аккредитованные для проведения измерений объемной активности радона	12
Включить раздел «Радон» в рамках проверок, осуществляемых региональным агентством здравоохранения ARS или инспекцией по труду	13
Адаптировать способы ослабления воздействия радона к особым местам выполнения работ	14
<b>Направление 4. Разработать и внедрить новые инструменты управления и работоспособный механизм реализации обследования зданий, а также выполнения работ профессионалами жилищно-гражданского строительства</b>	
<b>Действия</b>	<b>№ карты действий</b>
Завершить работы по картированию территории страны по радоноопасности	15
Внедрить новую картографию зон, связанных с риском нахождения радона	16
Стандартизировать существующие руководства по методологии измерений в особых зонах с повышенным содержанием радона	17
Доработать новые нормативы по обследованию зданий	18
Доработать перенос норм французской ассоциации по нормированию (AFNOR), относящихся к измерению объемной активности радона в воздухе и в воде, в международные нормы ISO	19
Внедрить механизм сертификации технических специалистов по обследованию здания (положение кодекса по строительству L.271-6 CCH)	20
Адаптировать решения по ослаблению воздействия к особенностям жилых помещений	21

Обеспечить согласованность работ по экономии энергии и улучшению качества воздуха внутри помещений (в том числе в отношении радона)	22
Создать учебный комплект, предназначенный для профессионалов жилищно-гражданского строительства	23
Оценить возможность перегруппировки/систематизации всех данных, относящихся к измерению радона (общественные места, жилые здания и места работы)	24
<b>Направление 5. Координировать политику в сфере разработок и исследований</b>	
<b>Действия</b>	<b>№ карты действий</b>
Составить руководство для выполнения количественных оценок радоновых рисков (EQRS) на региональном уровне	25
Ввести измерение содержания радона в санитарный контроль питьевого водоснабжения	26
Изучить возможности применения экспрессных методов по оценке уровней поступления радона в жилище	27
Изучить уровень поступления радона в здания при применении различных строительных типологий	28
Внедрить международный научный надзор (участие IRSN в международных исследованиях)	29
Проверить соответствие национального плана действий готовящейся новой директиве Евroatома	30

Как видно из представленной таблицы, мероприятия каждого направления представляют собой набор карт действия, в которых детально изложены цель и предмет действия, исполнители, сроки и индикаторы выполнения. Всего таких карт действия 30. В качестве примера ниже приведена одна из карт действия.

## Пример карты действия НПД Франции

<b>Карта действия № 1</b>	
Национального плана действий на 2011–2015 годы, касающегося политики в сфере управления риском, связанным с радоном, в существующих зданиях, предназначенных для жилья	
Дата создания карты	26 января 2011
Название действия (заголовок)	<i>Подвести итог программы, относящейся к измерению и ослаблению воздействия в частных жилых помещениях в регионе Лимузен (действие плана 2005-/2008гг.)</i>
Предмет (описание)	<p>Подготовить отчет по программе, позволяющий внести пояснения/заключения в механизм сопровождения новых норм, относящихся к содержанию радона в жилых помещениях.</p> <p>Подготовить действие 5: «создать руководство, предназначенное для административных территориальных образований».</p> <p>ASN создал рабочую группу, объединяющую национальные субъекты и местные субъекты региона Лимузен. «Уменьшение подверженности воздействию радона в предназначенных для жилья зданиях и обеспечение лучшей оценки рисков» было записано как приоритетное действие регионального Плана по охране здоровья и окружающей среды региона Лимузен. Это действие было, кроме того, подтверждено в рамках региональной политики здравоохранения, принятой региональным советом 18 января 2007 г.</p>
Руководитель работ (организация)	Регион Лимузен / ASN
Участники (организации)	Регион Лимузен Университет Лиможа, PNR, CEMRAD/Pe@rl, LIMAIR, PFTBât, ARS Лимузен, IRSN, CSTB,ASN

Цель	<p>Для этого проекта были определены четыре цели:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Способствовать оценке подверженности риску, связанному с радоном, в частных жилых помещениях;</li> <li>• Понять реакцию местных субъектов;</li> <li>• Изучить осуществимость управления риском, связанным с радоном, в рамках операций с недвижимостью и реабилитации недвижимости. Изучить осуществимость рассматриваемых действий на различном уровне (местные инициативы; информация, предоставленная покупателю жилья, расположенного в зоне риска, связанного с радоном, в рамках документации по техническому обследованию жилья; обязанности собственников-арендодателей в зоне риска, связанного с радоном; обязательства для всех собственников в зоне риска, связанного с радоном);</li> <li>• Оценить необходимость ослабления воздействия и предложить технические и финансовые решения.</li> </ul>
Способ / инструменты	<p>Рабочей Группой была подготовлена «Опытная программа по уменьшению риска, связанного с радоном, в частных жилых помещениях региона Лимузен». Был подготовлен План по финансированию этой опытной программы, распределенный в зависимости от разных действий, и было подписано рамочное соглашение между спонсорами и основными участниками программы (ASN, Региональный Совет Лимузена, Государство, Университет Лиможа, PNR коммуны Мильваш).</p>
Современное состояние	<p>Последнее собрание региональной рабочей группы: 21 сентября 2010</p>
Срок исполнения для операционного ввода в действие (или доработка, в зависимости от конкретного случая)	<p>Отчет по программе предусмотрен на первый квартал 2011 г.</p>

**Глава 8**  
**ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ**  
**ОГРАНИЧЕНИЯ ОБЛУЧЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ**  
**РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ РАДОНОМ И ДОЧЕРНИМИ**  
**ПРОДУКТАМИ ЕГО РАСПАДА. СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ЦЕЛИ.**  
**МЕТОДЫ ДОСТИЖЕНИЯ**  
**(С.М. Киселев)**

*В данной главе на основе анализа результатов деятельности по снижению облучения населения радоном в Российской Федерации, сформулирован перечень накопленных проблем. Констатируется, что решение этих «старых» проблем должно осуществляться с учетом новых вызовов, появление которых связано с новыми данными, свидетельствующими об отсутствии порога объемной активности (ОА), ниже которого радоновое облучение не представляет никакой опасности. Используя новые знания об опасности радона, обоснована необходимость совершенствования принятой в Российской Федерации радоновой стратегии, реализация которой должна осуществляться на основе национального плана действий, разработанного в соответствии с рекомендациями ВОЗ, МКРЗ и МАГАТЭ. Основываясь на рекомендациях этих международных организаций, разработаны предложения о порядке формирования национального плана действий, а также перечень его основных мероприятий.*

**8.1. Обоснование необходимости совершенствования деятельности по реализации принятой в России радоновой стратегии**

Основные положения принятой в настоящее время в радоновой стратегии Российской Федерации, были сформулированы в «Основах государственной политики в области обеспечения ядерной и радиаци-

онной безопасности Российской Федерации на период до 2010 года и дальнейшую перспективу», утвержденных Президентом РФ в 2003 г.

В «Основах государственной политики...» был учтен предшествующий более чем десятилетний отечественный опыт по совершенствованию радиационной защиты населения от радона в жилищах и на рабочих местах. В 1993 г. была утверждена «Федеральная целевая программа снижения уровней облучения населения России и производственного персонала от природных радиоактивных источников на 1994 – 1996 годы» (ФЦП «Радон») [1], мероприятия которой формировались с учетом рекомендаций Публикации 65 МКРЗ [2]. Была разработана законодательная и нормативная база регулирования на основе действующих в тот период международных рекомендаций МКРЗ и МАГАТЭ. В частности, были приняты федеральные законы «О радиационной безопасности населения» (1996 г.), «О санитарно-эпидемиологическом благополучии» (1999 г.), Федеральный закон «Градостроительный кодекс Российской Федерации» (2004 г.) «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» (2009 г.) [3–6]. В них устанавливаются требования по ограничению облучения населения, обусловленного радоном, по учету природного гаммафона при выборе земельных участков, проектировании и строительстве зданий, радиационному контролю стройматериалов, а также к санитарно-гигиеническим условиям проживания в жилых помещениях. Утверждены Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09 [7], Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010) [8] и Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения (СанПиН 2.6.1.2800-10) [9].

Важно также отметить, что основная деятельность по снижению облучения населения радоном осуществлялась рядом федеральных и региональных министерств и ведомств в сфере установленных полномочий, которая координировалась на национальном уровне в рамках утвержденной «Федеральной целевой программы... на 1994 – 1996 годы». К сожалению, из-за недостаточного финансирования ФЦП вскоре была закрыта, поэтому большинство из намечен-

ных мероприятий выполнено лишь частично. С 2000 года эта работа продолжилась фрагментарно, по отдельным направлениям, включенным в федеральные целевые программы (ФЦП) «Ядерная и радиационная безопасность России на 2000-2006 гг.» и «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года». Таким образом, к настоящему времени была утрачена такая важная составляющая реализации радоновой стратегии, как координация этой деятельности на федеральном уровне.

Положительную роль в оценке радоновой опасности сыграл ряд постановлений Правительства Российской Федерации. В 1997 г. принято решение о создании Единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан (ЕСКИД) [10], с 1998 г. вводится обязательная радиационно-гигиеническая паспортизация организаций и территорий [11], а в 2000 г. утверждается Положение о социально-гигиеническом мониторинге [12].

Наряду с работами по оценке облучения населения радоном в жилищах получили с развитием превентивные мер при строительстве новых сооружений и корректирующих действий в существующих зданиях, направленные на снижение концентраций радона внутри помещений. В соответствии с требованиями указанных ранее законов разработана нормативно-методическая база, регламентирующая уровни облучения радоном при строительстве новых зданий. Как отмечалось ранее, при выборе земельных участков под строительство введен контроль гамма-излучения и уровней выделения радона, а при проектировании и строительстве – уровней поступления радона в помещения и природной радиоактивности строительных материалов. При приемке зданий и сооружений в эксплуатацию предусмотрен контроль содержания радона в воздухе помещений и гамма-излучения природных радионуклидов. Введен прямой запрет на использование стройматериалов и изделий, не отвечающих требованиям радиационной безопасности. Вместе с тем корректирующие действия, направленные на снижение содержания радона в существующих зданиях, не получили должного развития в стране.

Анализируя в целом результаты реализации радоновой стратегии в Российской Федерации, можно отметить следующее. К 2015 г. на основе принятых законов в стране создана и постоян-

но совершенствуется нормативно-методическая база регулирования, которая по глубине проработки (наличие руководств, методических указаний, рекомендаций и т. п.) является основой для реализации радоновой стратегии. В Федеральном банке данных накоплена информация по результатам многолетних мгновенных измерений объемной активности радона в помещениях, на базе которых проведена оценка степени радоноопасности каждого региона. Вместе с тем, известно, что современные оценки среднегодовых уровней объемной активности радона получают при его сезонных измерениях. В настоящее время рядом научных организаций проведены в отдельных регионах репрезентативные сезонные измерения объемной активности радона в обследованных жилищах [13–22], что позволяет объективно оценить облучение радиоактивным газом населения в жилищах.

Осуществляется внедрение превентивных мер, направленных на снижение концентрации радона при строительстве новых зданий. Однако вопрос обязательного санитарного или декларируемого строителями контроля содержания радона при вводе в эксплуатацию новых зданий требует дополнительного рассмотрения.

Корректирующие действия по снижению уровня радона в помещениях не получили должного распространения среди домовладельцев. Низкий уровень информированности населения не способствует развитию мотивации у домовладельцев, арендаторов и покупателей жилья к измерению уровней радона и проведению корректирующих действий. Отсутствует общенациональная база данных по наилучшим практикам применения в строительном бизнесе превентивных мер и корректирующих действий. Это затрудняет оценку реальной эффективности проводимых мероприятий и определение оптимальных направлений их совершенствования

Нет достоверных данных об осведомленности с данной проблемой заинтересованных лиц (врачей, строителей, адвокатов, участников рынка недвижимости и т. д.). Отсутствуют официальные количественные оценки радон-индуцированных раков легкого в стране (в первую очередь, в радоно-опасных районах).

Слабо развит рынок «радоновых услуг» (аккредитованные услуги по сезонным и годовым измерениям, корректирующим действиями т. п.).

Все это, в конечном итоге, не способствует развитию культуры радиационной безопасности населения, направленной на четкое осознание им рисков, связанных с радоном, и необходимости выполнения, в первую очередь своими силами, мероприятий по их снижению.

Только эти перечисленные проблемы поставили на повестку дня вопрос об оптимизации направлений деятельности по снижению радоновой опасности.

Однако, как оказалось, необходимость совершенствования программы работ по реализации радоновой стратегии не ограничивается только решением этих проблем.

Новые данные, накопленные в результате эпидемиологических исследований [23 – 30], привели к пониманию того, что не существует порога объемной активности (ОА), ниже которого радоновое облучение не представляет никакой опасности. Изменилась также и философия радиационной защиты, которая была изложена МКРЗ в 2007 г. в Публикации 103. Эти обстоятельства стали основой для разработки в мире новых подходов к защите населения от облучения этим радиоактивным газом. Они изложены в Руководстве ВОЗ по радону в жилищах [31], Публикации 126 МКРЗ [32] и руководстве МАГАТЭ (SSG 32) «Защита населения от облучения радоном и другими природными источниками излучения в помещении» [33], подробное содержание которых приведено ранее в главе 7.1. (раздел 7.1.1.)

Таким образом, можно констатировать, что принятие новых рекомендаций ВОЗ, МКРЗ и МАГАТЭ, а также целый ряд перечисленных ранее нерешенных проблем, являются объективными причинами совершенствования радоновой стратегии в Российской Федерации. Основываясь на этих положениях, разработаны предложения для федеральных органов власти Российской Федерации по снижению облучения радоном. Их суть заключается в формировании на основе межведомственного взаимодействия четкого и детального национального плана действий (НПД) в соответствии с рекомендованным МАГАТЭ алгоритмом [34]. При этом также целесообразно рассмотреть вопрос о внесении соответствующих изменений в радоновую стратегию страны, изложенную в «Основах государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской

Федерации на период до 2025 года», утвержденных Указом Президента РФ от 1 марта 2012 г. № Пр-539.

Учитывая предшествующий опыт деятельности по снижению радоновой опасности в России целесообразно принять современную радоновую стратегию Российской Федерации, реализация которой должна осуществляться на основе национального плана действий, разработанного в соответствии с рекомендациями ВОЗ, МКРЗ и МАГАТЭ.

## **8.2. Предложения для федеральных органов исполнительной власти по реализации радоновой стратегии в соответствии с международными рекомендациями**

### **8.2.1. Предложения по организационным мероприятиям**

#### **Принятие решения о национальном плане действий**

Принципиальное предложение по совершенствованию радоновой стратегии состоит в решении вопроса на правительственном уровне о принятии в нашей стране национального плана действий. Особенность российского национального плана, как показывает сложившаяся в стране практика обеспечения радиационной безопасности населения, может состоять в приоритетности снижения облучения населения от воздействия радона, осуществляемых и едином пакете мер по радиационной защите от всех природных источников излучения.

После принятия решения о разработке национального плана действий следующим шагом должна быть организация деятельности по формированию его основных направлений и определению национальных органов, ответственных как за координацию работ по выполнению НПД, так и реализацию национальной радоновой стратегии в целом.

**Формирование национального плана действий.** Как показывает зарубежный опыт, этот процесс занимает достаточно длительный период и также регламентируется правительственными решениями. Например, для стран Европейского союза решение о формировании

национальных планов действия принято Директивой ЕС. Для его реализации отведен 4-х летний переходный период, предусматривающий соответствующую адаптацию странами-членами ЕС национальных законов, регулирующих и административных документов [35]. В Швейцарии был определен 2-х летний переходный период (2012–2014 гг.) для формирования нового законодательства в сфере защиты населения от радона [36].

На основании опыта зарубежных стран можно полагать, что отечественный национальный план действий по своей структуре должен содержать 3 этапа.

Первый этап – этап обоснования (примерно 2-3 года) должен предусматривать мероприятия по соответствующей адаптации нормативно-регулирующей базы и административной документации федерального и регионального уровня к международным рекомендациям, разработке перечня первоочередных мероприятий, а также оценку необходимых финансовых затрат федерального и региональных бюджетов. К примеру, в Норвегии при определении затрат на реализацию НПД была обоснована экономическая эффективность корректирующих действий по снижению радона в существующих зданиях при уровнях выше  $200 \text{ Бк/м}^3$ . Оценена средняя стоимость общих затрат на обследование и корректирующие действия для всех детских садов, школ, учебных заведений, а также единицы съемного жилья. Кроме того, оценена в 3 млн. норвежских крон стоимость предотвращения возникновения рака легкого при уменьшении действующего лимита до  $100 \text{ Бк/м}^3$  [37].

Второй этап – этап реализации, (примерно 5–7 лет) должен предусматривать выполнение взаимоувязанных мероприятий, а также индикаторы, позволяющие периодически контролировать ход их выполнения. К примеру, в Швеции индикатором стало снижение концентрации радона ниже уровня  $200 \text{ Бк/м}^3$  во всех жилых помещениях к 2020 г., а в школах и детских садах – к 2010 г. [38]; в Швейцарии – уменьшение за период 1994–2014 гг. облучения населения радоном в 2 раза и т. п. [36].

Третий этап – перспектива – (10 лет) должен предусматривать выполнение перспективных мероприятий, нацеленных на достиже-

ние стратегической цели: снижение случаев радон-индуцированного рака легкого. В качестве индикаторов должны быть указаны значения, установленные на основе критерия: «предотвращение определенного количества возникновения рака легкого/уменьшение облучения до определенного (например, до 100 Бк/м<sup>3</sup>) уровня» в 17 выявленных радоноопасных субъектах Российской Федерации.

### **Определение национальных органов, ответственных за реализацию национального плана действий и национальной радоновой стратегии**

При определении этих органов представляется целесообразным рассмотреть отечественный и зарубежный опыт. Почти двадцатилетняя практика решения проблемы защиты от радона в России (как на федеральном, так и региональном уровне) состояла в осуществлении министерствами и ведомствами этой деятельности в рамках возложенных на них полномочий и не предполагала координацию усилий для достижения стратегической цели – снижения заболеваемости и смертности населения от радон-индуцированных раков легкого. Следует отметить, что стране имеется определенный позитивный опыт координации работ по радоновой проблеме. Он был накоплен задолго до выхода современных международных рекомендаций, в которых указывалось на необходимость координации межведомственного взаимодействия при реализации радоновой стратегии. Этот опыт был приобретён в ходе выполнения принятой в 1993 г. «Федеральной целевой программы снижения уровней облучения населения России и производственного персонала от природных радиоактивных источников на 1994–1996 годы». В данный период координация на федеральном уровне межведомственного научного взаимодействия осуществлялась под управлением Дирекции программы, возглавляемой известным отечественным ученым, стоящим у истоков этой проблемы, профессором Э.М. Крисюком. К сожалению, этот опыт не получил должного развития в связи с закрытием ФЦП в силу известных причин [39]. Более того, как отмечалось ранее, деятельность по снижению уровней облучения населения радоном стала развиваться фраг-

ментарно в рамках федеральных целевых программ (ФЦП) «Ядерная и радиационная безопасность России на 2000-2006 гг.» и «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 г.». Стратегическая цель этих ФЦП состояла в ликвидации ядерного наследия, достижение которой не предполагало приоритетного развития радоновой проблемы. Это в конечном итоге позволило Госкорпорации «Росатом» как заказчику – координатору ФЦП принять решение о прекращении с 2016 года финансирования работ по радоновой тематике на федеральном уровне и рекомендовать их выполнение только на региональном уровне.

За прошедший период работы по реализации радоновой стратегии осуществлялись, Роспотребнадзором, в основном, в рамках возложенных полномочий в сфере обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения: разработка нормативно-методической базы регулирования, контроля доз облучения и надзорные функции.

За рубежом, как правило, получила развитие диаметрально противоположная практика реализации радоновой стратегии. Координация этих работ возлагалась на одно из министерств или ведомств (как например, в Чехии или Норвегии [40, 37]) или на федеральный орган власти (как например, в США и Канаде [41, 42]). Эти органы государственной власти наделялись соответствующими полномочиями, которые предусматривали при выполнении национальных планов действий (НПД) осуществление межведомственного взаимодействия на основе разделения ответственности между центром и регионами. Эффективность взаимодействия считается ключевым звеном для достижения позитивных результатов и до настоящего времени в ряде стран является предметом острых дискуссий при поиске оптимальных решений в реализации радоновой стратегии [38]. Достаточно подробно эта деятельность изложена в главе 7.1. (раздел 7.1.2).

На основе анализа отечественного и зарубежного опыта, представляется обоснованным сделать следующие предложения об определении органов, ответственных за реализацию национальной радоновой стратегии и координацию Национального плана действий в Российской Федерации.

**Роль органа, ответственного за формирование, координацию и контроль выполнения Национального плана действий** в Российской Федерации может быть возложена на федеральный орган, ответственный за проведение государственной политики в области общественного здравоохранения (Минздрав России), либо обеспечения радиационной безопасности населения (Роспотребнадзор). При этом в положение назначенного федерального органа исполнительной власти целесообразно внести соответствующий пункт о полномочиях, которые определяют его права, обязанности и ответственность как координатора работ по радоновой проблеме.

Учитывая достаточно сложный механизм взаимодействия министерств и ведомств, ответственных за реализацию национального плана действий, с субъектами Российской Федерации, без участия которых решение данной проблемы невозможно, целесообразно рассмотреть вопрос о создании Правительственной комиссии по радону (или природным источникам излучения). Эта комиссия (по аналогии с Евроатомом ЕС или Правительственной комиссией по химической и биологической безопасности) должна будет выполнять функции координирующего и контролирующего органа по реализации радоновой стратегии страны в целом. Она должна координировать и контролировать ход взаимодействия между региональными и федеральными органами власти, обеспечить согласованность национального плана действий с другими национальными программами, контролировать эффективность деятельности при установленном распределении ответственности за ситуацию облучения радоном. В ее состав могут быть включены представители федеральных органов власти, ответственных за реализацию государственной политики в области общественного здравоохранения, радиационной защиты, социального обеспечения, охраны окружающей среды, строительства и жилищно-коммунального хозяйства, науки и образования, а также представители федеральных округов или регионов. Как показывает зарубежный опыт, в состав комиссии целесообразно включить представителей общественных организаций, профсоюзов, которые являются заинтересованными сторонами в решении радоновой проблемы и будут эффективно способствовать осведомленности населения о проводимых работах.

## **8.2.2. Предложения по отдельным компонентам рекомендованного ВОЗ, МКРЗ и МАГАТЭ национального плана действий**

### **Совершенствование нормативно-правовой базы**

В настоящее время в Российской Федерации действует современная нормативно-правовая система обеспечения радиационной безопасности населения при воздействии природных источников излучения в производственных и коммунальных условиях. Вместе с тем вышедшие в свет в 2014 г. Публикация 126 МКРЗ и Руководство МАГАТЭ «Защита населения от облучения радоном и другими природными источниками излучения в помещении» внесли ряд принципиальных изменений в ранее существовавшую стратегию защиты населения от радона. Представляется целесообразным еще раз напомнить, что научной основой этих изменений стали данные эпидемиологических исследований, свидетельствующие о неблагоприятном воздействии радона при уровнях около  $40 \text{ Бк/м}^3$ , характерных для среднемировых значений ОА. Эти данные изменили ранее существовавший подход МКРЗ, при котором меры по снижению радона в помещениях рекомендовались только в случае превышения уровней действия (Публикация 65 МКРЗ), что создавало неверное представление о безопасности воздействия ниже этого уровня. Кроме того, в соответствие с новой системой радиационной защиты, постулированной в публикации МКРЗ 103 [43], ситуация облучения населения радоном относится к ситуации существующего облучения. Принципы регулирования данной ситуации облучения базируются на установлении референтных уровней и применении принципа оптимизации при принятии и реализации соответствующих мер защиты. Суть этих мер состоит в проведении долговременных мероприятий по постепенному уменьшению концентрации радона в жилищах путем периодического снижения уровней вмешательства до возможно достижимых минимальных значений.

Принятая МКРЗ новая стратегия защиты от радона, потребует детального рассмотрения отечественной системы гигиенических требований по ограничению облучения населения природными источниками излучения и внесения на этой основе необходимых изменений в

действующие документы российской нормативно-правовой базы регулирования. Можно привести несколько примеров, подтверждающих актуальность этих действий. Необходимо также рассмотреть вопрос об основной нормируемой величине – эквивалентной равновесной объемной активности радона (ЭРОА). По-видимому, целесообразно перейти к нормированию по используемой в большинстве стран величине среднегодовой объемной активностью (ОА) радона в воздухе вместо принятой в нашей стране величины среднегодовой ЭРОА, которую крайне сложно определить инструментальными методами. Использование величины среднегодовой ОА радона в нормировании имеет свои преимущества, так как позволяет инструментально оценить ее с применением интегральных методов измерений.

Требуют обсуждения подходы оптимального соотношения обязательных и стимулирующих подходов в сфере защиты от радона в существующих жилых помещениях, а также при проектировании, строительстве и сдаче в эксплуатацию новых зданий.

Принципиального решения требует вопрос о переходе от нормативов к референтным уровням. В соответствии с международными рекомендациями должен быть рассмотрен вопрос об установлении национального референтного уровня. Однако, для Российской Федерации, обширная территория которой характеризуется разной радоноопасностью, необходимо отдельно рассмотреть вопрос об установлении региональных референтных уровней, в первую очередь для регионов с повышенными и высокими уровнями облучения населения природными источниками.

Более подробно вопросы совершенствования и гармонизации нормативной базы регулирования, отвечающей современным рекомендациям новой стратегии защиты от радона, рассматриваются в отчете НИИ радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Роспотребнадзора [44], положения которого могут стать научной основой для обсуждения и подготовки соответствующих предложений в сфере совершенствования нормативной базы защиты населения от радона.

Для подготовки предложений по совершенствованию нормативной базы регулирования, отвечающей современным рекоменда-

ям и новой стратегии радиационной защиты от радона, целесообразно создать рабочую группу экспертов. Создание и деятельность этой группы должны регламентироваться приказом федеральных органов исполнительной власти, ответственных за обеспечение радиационной безопасности населения, или соответствующим распоряжением Правительства Российской Федерации. Результаты работы должны рассматриваться как один из этапов формирования национального плана действий.

### **Проведение радоновых обследований и определение радоноопасных территорий**

В Российской Федерации, учитывая территориальные размеры страны, неразвитую инфраструктуру измерений, организовать как оценочные, так и репрезентативные радоновые обследования на национальном и региональном уровне на основе интегральных измерений радона было довольно проблематично, в том числе из-за огромных финансовых затрат. Поэтому в стране получило развитие обследования территорий, в ходе которых отдельными научными организациями проводились измерения объемной активности радона с использованием интегральных методов измерения. Одновременно подобным образом было организован сбор геофизических данных о земной поверхности. Однако, в отличие от стран Европы и США, радоноопасные районы на национальном уровне были выявлены на основе результатов мгновенных измерений ОА и ЭРОА радона в помещениях, проведенных в рамках функционирования единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан (ЕСКИД), программ радиационно-гигиенической паспортизации и социально-гигиенического мониторинга. Сбор результатов измерений осуществлялся по единой отчетной форме (№ 4–ДОЗ) и передавался в информационно-аналитическую систему Федерального банка данных о природных источниках излучения. Как отмечается в работе [45], кумулятивный характер накопления данных о дозах и принцип «нарастающего итога», заложенные в основу построения информационно-аналитической системы, позволили на основе обобщения информации, накопленной в Федеральном банке данных на

основе мгновенных измерений, оценить радоноопасность территорий страны и выделить 17 наиболее радоноопасных регионов Российской Федерации. Таким образом, функционирование этой системы дало возможность решить главную задачу – определить радоноопасные регионы на территории страны. Дальнейшее развитие этой системы на основе накопления информации по результатам мгновенных измерений и представление их по действующей форме № 4-ДОЗ является недостаточно рациональным.

Логическим продолжением этих работ должна быть организация на национальном уровне репрезентативных радоновых обследований с использованием интегральных методов измерения радона и создание карты концентраций радона в жилищах. Это закономерно потребует изменения формы представления информации по форме № 4-ДОЗ в информационно-аналитическую систему Федерального банка данных, а также совершенствования системы сбора сведений об измерениях. Создание Роспотребнадзором в каждом федеральном округе межрегиональных центров по вопросам радиационной безопасности [46], которые способны в будущем осуществлять поддержку радоновых обследований на основе интегральных методов измерения, может рассматриваться в качестве первого организационного шага в этом направлении.

По-видимому, аналогичным образом необходимо организовать работы по исследованию геолого-геофизических характеристик земной поверхности и формированию на федеральном уровне соответствующего банка данных. Накопленная информация станет основой для создания карты естественной радиации страны.

В конечном итоге указанные национальные базы данных и карты позволят приступить к решению главной задачи – разработке Российского атласа естественной радиации, как это делается в странах ЕС [47], или карты радоновых зон России для каждого района всех регионов Российской Федерации, как это сделано для округов в США (<http://www.epa.gov>).

Учитывая реальные экономические возможности нашей страны, Российские атлас или карту радоновых зон можно рассматривать в настоящее время как ориентир, в направлении которого поэтапно

должна собираться информация о радоновых обследованиях на основе интегральных методов измерения.

Вопрос организации репрезентативных радоновых обследований детально рассмотрен в ряде отечественных научно-исследовательских отчетов, выполненных в рамках федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 г. и на период до 2015 г.» [48–54]. Кроме того, МАГАТЭ выпустило руководство «Национальные и региональные обследования концентраций радона в жилищах: обзор методологии и измерительной техники «National and Regional Surveys of Radon Concentration in Dwellings: Review of Methodology and Measurement Techniques (IAEA/AQ/33)» [55].

Однако наличие детальных руководств и даже соответствующей техники не позволит достичь успеха в организации репрезентативных радоновых обследований без четкого разделения полномочий между федеральным центром и субъектами Российской Федерации. Федеральный центр должен осуществлять сбор сведений и научно-методическое сопровождение обследований, для обеспечения которых могут быть использованы, как указывалось ранее, созданные в каждом федеральном округе межрегиональные центры по вопросам радиационной безопасности [46]. Представляется целесообразным также привлечь к этой работе (с учетом дефицита кадров) научно-исследовательские институты федерального подчинения независимо от их ведомственной принадлежности, имеющие достаточный опыт работ в области радиационной защиты от радона. Субъекты Российской Федерации должны организовать непосредственное проведение указанных обследований и накопление информации на региональном уровне с последующим ее представлением в Федеральный банк данных.

Полученные на уровне субъектов сведения о степени радоноопасности входящих в их состав территорий позволят оценивать региональные ресурсы при осуществлении мер, обеспечивающих при строительстве новых или реабилитации существующих зданий их радонорезистентность.

Эти предложения сформулированы на основе анализа ряда проводимых в Российской Федерации государственных программ

(например, «Химическая и биологическая безопасность», «Ядерная и радиационная безопасность») являются оригинальными, реализация которых на местах осуществляется на основе взаимодействия учреждений федерального и регионального уровня. В этом плане координация и периодический контроль со стороны предложенной ранее в качестве национального органа Правительственной комиссии по радону (или природным источникам излучения) представляется оптимальным механизмом, стимулирующим реальное развитие радоновых обследований в регионах и стране в целом.

Развитие радоновых обследований с использованием интегральных методов измерения на региональном и национальном уровне, создание на их основе базы данных и атласа (или карты) радоновых зон не имеют реальной альтернативы в плане оценки радоноопасности территории Российской Федерации. Эти работы имеют огромное практическое значение для рационального использования ресурсов при планировании и осуществлении мероприятий по обеспечению радонорезистентности при строительстве новых или реабилитации существующих зданий.

### **Превентивные меры и корректирующие действия**

Перечисленные выше мероприятия были кратко изложены ранее и должны получить дальнейшее развитие в национальном плане действий. При этом следует отметить, что существующая нормативно-методическая база регулирования в области снижения облучения населения в зданиях не является лимитирующим фактором в проведении этих мероприятий, в том числе и корректирующих действий, которые до настоящего времени не получили должного развития. Более того, регулирующая база постоянно совершенствовалась и представлена широким набором документов [7, 8, 9, 56–74]. В результате анализа этих материалов предложены направления ее совершенствования в области превентивных мер при строительстве новых зданий и сооружений [75], которые должны быть учтены при формировании национального плана действий.

Основная проблема, которая должна получить свое развитие в будущем, состоит в разработке эффективной системы мер по практи-

ческой реализации основных положений, изложенных в нормативно-методических документах. В этих целях целесообразно руководствоваться рекомендациями МАГАТЭ [34], суть которых можно кратко изложить следующим образом.

Во-первых, в стране, и особенно на региональном уровне, должен быть налажен механизм отбора организаций, способных внедрять эффективные превентивные меры и корректирующие действия в соответствии с установленными стандартами качества в области строительного менеджмента. В этом плане по-прежнему актуальным является включение темы «радон» в учебные программы всех строительных специальностей (архитекторы, строители, строительные инспекторы и т. д.) для обеспечения базовыми знаниями в области радонобезопасности зданий, которые необходимы при применении превентивных мероприятий и корректирующих действий.

Во-вторых, при осуществлении превентивных или корректирующих действий должен быть на постоянной основе налажен процесс периодической оценки эффективности радонозащитенности зданий, осуществляемый техническими специалистами, имеющими необходимый опыт и соответствующий сертификат. Целесообразно предусмотреть, учитывая опыт европейских стран [76, 77], создание национальной и региональных баз данных по статистическому учету радонобезопасных зданий, а также по «хорошим практикам» строительных технологий. Оптимальным вариантом было бы также ежегодное представление сведений о мерах по снижению концентрации радона в питьевой воде и результатах контроля содержания радия в строительных материалах. Следует предусмотреть в соответствующих нормативных актах обязанность направлять в национальную и региональные базы такую информацию не только государственным учреждениям, но и частным компаниям. По результатам периодической оценки качества превентивных мер и корректирующих действий должны вноситься изменения в нормативно-методические документы и законодательные акты, в том числе по вопросам, определяющим обстоятельства, при которых осуществление мер по ограничению и сокращению воздействия радона должно носить обязательный или добровольный характер. В этом плане интересен опыт Чехии, когда

при реализации первого национального плана действий правительство осуществляло финансирование корректирующих действий без эффективного контроля и при отсутствии должных навыков у строителей. Оказалось, что 25 % работ были недоброкачественными, а в отдельных случаях ситуация стала хуже после их проведения, что вызывало недоверие населения к радоновым программам. В связи с этим были изменены регулирующие документы, которые предусматривают в настоящее время обязательный жесткий контроль выполнения корректирующих действий на основе 2-шагового проверочного теста [76].

Проблема совершенствования превентивных мер при строительстве новых зданий и корректирующих действий в уже построенных сооружениях зависит от многих факторов, исследование которых должно стать одним из ведущих направлений при формировании национального плана действий. Следует отметить, что ее динамическое развитие во многом зависит не только от финансовой поддержки, но и от официально сформулированной на федеральном уровне позиции (по аналогии с позицией по вопросу табакокурения). Суть ее состоит в необходимости снижения уровня концентрации радона во всех зданиях и помещениях до разумно достижимого низкого уровня на основании использования принципа ALARA, что в конечном итоге должно привести к снижению радон-индуцированной смертности от рака легкого. Это во многом будет способствовать усилению внимания к проблеме радонозащитности зданий не только на уровне субъектов, но у отдельных граждан.

### **Подготовка кадров и развитие научно-образовательного кластера**

Реализация в стране долговременной радоновой стратегии требует от Министерства образования и науки Российской Федерации предметного развития научно-образовательного кластера и подготовки кадров в области радоновой тематики. Учитывая, что снижение радоновой опасности является как проблемой радиационной защиты населения, так и общественного здравоохранения, эта деятельность должна осуществляться в тесном сотрудничестве, в первую очередь,

с Минздравом России, Роспотребнадзором, а также Минприроды России, Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства и др.

В целом развитие научно-образовательного кластера и подготовки кадров должно быть нацелено на развитие следующих направлений:

- регулирование радиационной безопасности населения при облучении природными источниками излучения, в том числе радоном внутри помещений, на основе современных рекомендаций международных организаций;
- измерительные и диагностические методы и средства оценки уровней облучения населения радоном в зданиях;
- технологии «радонового диагноза» помещения: оценка реальных уровней, источников и путей поступления радона;
- оценка радонового потенциала и картирование территорий;
- информационно-аналитические системы формирования баз данных;
- инновационные технологии в области превентивных мер и корректирующих действий по обеспечению радонорезистентности зданий, а также методов оценки их эффективности;
- регулирование и контроль содержания радионуклидов в строительных материалах;
- технологии снижения содержания радона в источниках водоснабжения;
- эпидемиологические исследования и достоверность оценок риска радон-индуцированного рака легкого, выполненных ранее на основании теоретических расчетов;
- перспективные стратегии обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения, проживающего в различных типах помещений на основе оптимизации показателей уровня радона, характеристик атмосферного воздуха, воздухообмена, тепло- и энергоснабжения (концепция «здоровый дом»);

- оптимальные стратегии снижения радоновой опасности на уровне регионов по критерию затраты-эффективность;
- логистические модели взаимодействия федерального центра и субъектов в области снижения радоновой опасности.

Указанные направления развития научно-образовательного кластера и подготовки кадров предложены, с учетом аналогичных мер, реализуемых в рамках национальных планов снижения облучения населения радоном в европейских странах, США и Канаде. Их перечень должен быть оптимизирован на основании анализа мероприятий, проводимых в этой сфере в Российской Федерации.

### **Организация информирования населения и развитие эффективных коммуникационных технологий**

Эта деятельность занимает одно из ключевых мест при реализации радоновой стратегии, поскольку большинство мероприятий по снижению объемной активности радона в помещениях проводится в мире по решению домовладельцев за счет собственных ресурсов. Успех в данном направлении во многом определяется уровнем взаимодействия государственных органов власти, заинтересованных лиц и населения.

Сформулированное отношение к проблеме радона федерального центра имеет принципиальное значение. Поданный на национальном уровне органами власти «сигнал» о необходимости борьбы с радоновой опасностью является не только мощным катализатором в развитии интереса населения к предлагаемым защитным мерам, но и эффективным стимулятором повышения активности региональных властей. Результат подобных действий, осуществляемых на федеральном уровне, в частности, наглядно демонстрирует проводимая в нашей стране стратегия борьбы с табакокурением.

Одним из кардинальных факторов, влияющих на активное вовлечение населения в решение радоновой проблемы, является деятельность заинтересованных лиц. Это врачи, преподаватели, юристы, архитекторы, строители, работники коммунальных служб, общественные деятели и т. п., которые должны быть обеспечены базовыми знаниями о радоне. Активность этой группы общества определяется

не только их гражданской позицией, но и определенной мотивацией, вызванной, в первую очередь, стремлением к достижению успеха в своей профессиональной деятельности. Например, врач-пульмонолог, профессионально занимающийся проблемой снижения заболеваемости и смертности от рака легкого, для достижения успеха объективно заинтересован в разъяснении пациентам влияния радона на риск возникновения этого заболевания. В этом плане показателен зарубежный опыт по вовлечению заинтересованных лиц в решение данной проблемы. Так, в США современный этап реализации радоновой стратегии характеризуется организацией тесного взаимодействия федеральных органов власти (Агентство по охране окружающей среды, Министерство здравоохранения и социальных служб, Министерство жилья и градостроительства) с рядом неправительственных организаций, деятельность которых координирует Американская ассоциация пульмонологов (ALA). Под руководством ALA эти организации сосредотачивают свои усилия при активном взаимодействии с населением на отслеживании процесса реализации приоритетных направлений радоновой стратегии, осуществляют воздействие на рынок радоновых услуг [78, 79].

Данный опыт необходимо учесть при формировании национального плана действий. При этом для заинтересованных лиц должна быть предусмотрена возможность систематического повышения уровня знаний в области риска для здоровья облучения радоном и адекватных мер защиты.

При организации информирования должен использоваться принцип адресности. Федеральные органы исполнительной власти в рамках возложенных полномочий обязаны представлять предложения по обеспечению радиационной безопасности населения при воздействии радона в правительство. Решения правительства должны стимулировать меры по привлечению заинтересованных лиц к различным формам информирования населения и разработке эффективных коммуникационных технологий, направленных на совершенствование взаимодействия между местными органами власти, строительными организациями, общественными учреждениями, различными заинтересованными сторонами. В результате этой деятельности фор-

мируется доступная информационная среда для широкого вовлечения различных слоев общества в деятельность по снижению радоновой опасности.

Для Российской Федерации организация информирования населения о проблеме радона и развитие эффективных коммуникационных технологий в этой сфере являются актуальной задачей, решению которой в национальном плане действий должно быть отведено приоритетное место. В ее решении можно следовать рекомендациям МАГАТЭ [34], в которых изложена последовательность шагов от разработки первых базовых информационных листовок о необходимости измерения радона, о связи уровней радона в помещении с рисками для здоровья, включая курение, о реабилитационных мероприятиях – до создания долгосрочной коммуникационной стратегии и формирования региональных радоновых центров. Сформированная в рамках национального плана действий долгосрочная коммуникационная стратегия даст возможность на системной основе организовать исследования по состоянию осведомленности, проводить кампании для различных целевых аудиторий (влиятельные социальные группы, например, врачи, местные заинтересованные стороны, родители, учителя, журналисты и т. п.), в том числе, с использованием широкого спектра средств массовой информации.

В конечном итоге, даже следуя указанным рекомендациям МАГАТЭ [34], необходимо понимать, что достижение позитивных результатов в осознании населением опасности облучения радоном и необходимости проведения защитных мероприятий своими силами как для нашей страны, так и для большинства зарубежных стран (в этом плане показателен приведенный ранее пример Чехии [76]) является достаточно сложным и продолжительным по времени процессом. Его динамика во многом определяется не только накопленными знаниями и опытом в области снижения облучения радоном, но и современным уровнем культуры радиационной безопасности населения.

Эти обстоятельства должны быть учтены при планировании мероприятий по информированию населения и развитию эффективных коммуникационных технологий в национальном плане действий.

В заключение следует отметить, что представленные в данном разделе предложения основаны на современных рекомендациях ВОЗ, МКРЗ и МАГАТЭ, а также международном опыте в области реализации национальных радоновых стратегий. Данные предложения могут служить основой для совершенствования деятельности федеральных органов власти по снижению облучения радоном населения Российской Федерации. Эта деятельность имеет огромную социальную значимость, поскольку направлена на сохранение здоровья граждан Российской Федерации, а ее успех, как показывает мировой опыт, определяется во многом официально сформулированной на федеральном уровне позицией в области радоновой проблемы.

### *Литература*

1. «О федеральной целевой программе снижения уровня облучения населения России и производственного персонала от природных радиоактивных источников на 1994–1996 годы». Постановление Правительства Российской Федерации от 06.07.94 № 809. – 1994.
2. Защита от радона-222 в жилых зданиях и на рабочих местах. Публикация 65 МКРЗ // ICRP. – М.: Энергоатомиздат. – 1995.
3. О радиационной безопасности населения: Федеральный закон Российской Федерации от 9 января 1996 г. № 3-ФЗ; Принят Государственной Думой 5 декабря 1995 г.
4. О санитарно-эпидемиологическом благополучии: Федеральный закон Российской Федерации № 52-ФЗ от 30.03.1999 г. Принят Государственной Думой 12 марта 1999 г.
5. Градостроительный кодекс Российской Федерации: Федеральный закон Российской Федерации № 190-ФЗ от 29.12.2004 г. Принят Государственной Думой 22 декабря 2004 г.
6. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: Федеральный закон Российской Федерации № 384-ФЗ

- от 30.12.2009 г. Принят Государственной Думой 23 декабря 2009 г. Москва, 30 декабря 2009 г.
7. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). // Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09 – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. – 2009.
  8. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010) // Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. – 2010.
  9. Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет источников ионизирующего излучения: Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2800-10. – Москва: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. – 2011.
  10. «О порядке создания единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан». Постановление Правительства Российской Федерации от 16.06.1997 № 718. – Москва, АО «Кодекс». – 1997.
  11. О порядке разработки радиационно-гигиенических паспортов организаций и территорий (с изменениями на 10 июля 2014 года). Постановление Правительства РФ от 28 января 1997 г. № 93. – Москва, АО «Кодекс». – 1997.
  12. Об утверждении Положения о проведении социально-гигиенического мониторинга (с изменениями на 4 сентября 2012 года). Постановление Правительства Российской Федерации от 2 февраля 2006 г. № 60 г. – Москва, АО «Кодекс». – 2012.
  13. *Венков В.А.* Обобщение имеющихся данных и дополнительное обследование, и оценка доз облучения жителей г. Балей Читинской области за счет природных радионуклидов / *В.А. Венков, Т.А. Кормановская, И.П. Стамат* [и др.] // Отчет. № Гос. регистрации № 01.2.006 05991. СПб. – 2006.
  14. *Zhukovsky M., Yarmoshenko I.* Radon Survey in the Ural Region of Russia: Results and Analysis // Radiation Protection Management. – 1998. № 2. – P. 34–42.
  15. *Маренный А.М.* Проведение обследований зданий различного назначения на содержание радона на территориях, обслуживаемых

- ФМБА России / *А. М. Маренный, В.В.Романов, В. Астафуров* [и др.] // Радиационная гигиена. – 2015. Т. 8. № 1.
16. *Marennyy A.M., Nefedov N.A., Vorozhtsov A.S.* Results of radon concentration measurements in some regions of Russia. // Radiation Measurements. –1995. v.25, No1-4. – p.649-653.
  17. *Маренный А.М.* Сезонные измерения средней объемной активности радона в помещениях г. Лермонтов. / *А.М. Маренный, Н.А. Нефедов, А.С. Ворожцов, С.П. Верейко, П.Ф. Кокорев* // Материалы конференции «Практика защиты населения от облучения радоном». – 1996. – с.30-31.
  18. *Маренный А.М.* Средняя объемная активность радона в жилищах районов Оренбургской области / *А.М. Маренный, Н.А. Мешков, Н.А. Нефедов, А.С. Ворожцов, А.М. Русанов, Н.Н. Верещагин* // Материалы конференции «Практика защиты населения от облучения радоном». – 1996. – с.34.
  19. *Borisov V.P., Marennyy A.M., Saldan L.P.* Radon in dwellings in Altai region of Russia // IRPA Regional Congress on Radiation Protection in Central Europe. – Dubrovnik, Croatia, Vfe 20-25. – 2001
  20. *Marennyy A.M., Shinkarev S.M., Penezev A.V., Frolova A.V., Morozov Yu.A., Okhrimenko S.E., Savkin M.N., Hoshi M.* Assessment of exposure to the population of Moscow from natural sources of radiation. In: High Levels of Natural Radiation and Radon Areas: Radiation Doses and Health Effects // Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on high levels of natural radiation and radon areas, held in Osaka, Japan September 6-10, 2004. Eds.: T. Sugahara, H. Morishima, M. Sohrabi, Y. Sasaki, I. Hayata, S. Akiba. Elsevier, Amsterdam, pp 356-357. – 2005.
  21. *Маренный А.М.* Скрининговые исследования содержания радона в помещениях населенных пунктов / *А.М. Маренный* // В сб. «Гигиенические аспекты обеспечения радиационной безопасности населения на территориях с повышенным уровнем радиации». – Санкт-Петербург. 2008. – с. 99-101.
  22. *Маренный А.М.* Интегральные измерения средней объемной активности радона в помещениях населенных пунктов Челябин-

- ской области / *А.М. Маренный, Н.М. Андреев, В.И. Астафуров* [и др.] // В сб. тезисов конференции «Актуальные вопросы радиационной гигиены». – Санкт-Петербург. 2010. – с. 98-99.
23. *Baysson H., Tirmarche M., Tymen G, et al.* Indoor radon and lung cancer in France// *Epidemiology*. – 15(6): 709-716. – 2004.
  24. *Darby S., Hill D., Auvinen A., et al.* Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. // *Br. Med. J.* – 330(7485): 223. – 2005.
  25. *Darby S., Hill D., Deo H. Et al.* Residential radon and lung cancer – detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14 208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe. // *Scand. J. Work Environ. Health*. – 32 (Suppl. 1): 1–84. – 2006.
  26. *Krewski D.* Risk of lung cancer in North America associated with residential radon / *D. Krewski, J. Lubin, J.M. Zielinski [et al.]* // *Epidemiology*. – 16(2): 137–145. – 2005.
  27. *Krewski D.A.* combined analysis of North American case–control studies of residential radon and lung cancer / *D. Krewski, J. H. Lubin, J. M. Zielinski [et al]* // *J. Toxicol. Environ.Health Part A*. – 2006. Vol. 69 (7). – P. 533–598.
  28. *Lubin J.H., Wang Z.Y., Boice Jr. J.D. et al.* Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies. // *Int. J. Cancer*. – 109(1): 132–137. – 2004.
  29. Sources-to-Effects Assessment for Radon in Homes and Workplaces.// United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.2006 Report to the General Assembly, with scientific annexes. United Nations, New York. – 2009.
  30. Риск возникновения рака легкого при облучении радоном и продуктами его распада. Заявление по радону / под ред. *М.В. Жуковского, С.М. Киселева, А.Т. Губина* / пер. Публикации 115 МКРЗ // ICRP. – Москва: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России». – 2013.
  31. Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective // World Health Organisation (WHO). – Geneva: WHO Press. – 2009.

32. Руководство по защите от облучения радоном / под ред. М.В. Жуковского, И.В. Ярмошенко, С.М. Киселева / пер. Публикации 126 МКРЗ // ICRP. – Москва: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России». – 2015.
33. Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation, SSG 32 // IAEA. – Vienna. – 2014.
34. Алгоритм формирования национального плана действий МАГАТЭ, Проект IAEA // IAEA. – Vienna, 2015.
35. Council Directive 2013/59/Euratom, OJ L13 // Euratom. – 17.01.2014. P. 1–73.
36. National action plan concerning radon 2012-2020 // Swiss Federal Office of Public Health, Radiological Protection Division, 3003. – Bern. – URL: [www.ch-radon.ch](http://www.ch-radon.ch).
37. Strategy for the reduction of radon exposure in Norway // Norwegian Ministries, Norwegian Government Administration Services, Norwegian Government Administration Services. – URL: <http://radon.nrpa.no>. – 2010.
38. *Skeppström K.* Existing strategy and challenges for a national action plan for radon in Sweden // Swedish Radiation Safety Authority, URL: <http://www.ssi.se/> Oral presentation // ASN– NRPA Workshop, 2014 October 14. – Paris, France. – 2014.
39. Практика защиты населения от облучения радоном: Материалы науч. практ. междунар. конф. // АНРИ. – № 3(9). –1996/97.
40. *Davidková K.* National Radon Action Plan of the Czech Republic, 15 years of experiences, Oral presentation //ASN-NRPA Workshop, 2014 October 14. – Paris, France.
41. *Long B.* US Federal Radon Action Plan, Center for Radon and Air Toxics, Office of Air and Radiation // US EPA, HERCA Workshop, ASN Paris 30 September 2014.([www.epa.gov/radon](http://www.epa.gov/radon)). – 2014.
42. *Thompson P. et al.* Canadian radon strategy and action, Canadian Nuclear Safety Commission, Canadian provinces and territories, Health Canada. Oral presentation // HERCA Workshop, ASN Paris 30 September. – 2014.

43. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер с англ. / Под общей ред. *М.Ф. Киселёва* и *Н.К. Шандалы* // ICRP. – М.: Изд. ООО ПКФ «Алана». – 2009.
44. *Стамат И.П. и др.* Отчет о научно-исследовательской работе «Разработка предложений по формированию национального плана действий в части совершенствования инфраструктуры регулирования радонобезопасности населения» по Контракту № 31401099476 от 25.04.2014 г./ *И. П. Стамат* [и др.] // НИИРГ. – СПб. 2014.
45. *Стамат И.П.* Совершенствование гигиенических требований по ограничению облучения населения Российской Федерации природными источниками излучения / *И.П. Стамат* // Автореф. дис. докт. биол. наук. СПб., 2012.
46. О реорганизации межрегиональных центров по вопросам радиационной безопасности. Приказ от 21 января 2011 г. № 14 // Министерство здравоохранения и социального развития РФ. – 2011.
47. *Tollefsen T., Cinelli G., Bossew P., et al.* From the European indoor radon map towards an Atlas of natural radiation // Radiation Protection Dosimetry. –2014. Vol. 162, № 1–2. – P. 129–134.
48. *Губин А.Т.* Отчет о НИР «Формирование основных положений национального плана действий по обеспечению радонобезопасности населения России. Контракт № 11-11-02 от 01 июня 2011 г./ *А.Т. Губин* [и др.] // ФГУП Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены. – 2011.
49. *Стамат И.П.* Отчет о НИР «Методическое обеспечение регулирования радонобезопасности населения. Разработка и обоснование основных положений методических указаний по формированию региональных целевых программ, направленных на обеспечение радонобезопасности населения России». Контракт № 20-3-14-2012 от 13 августа 2012 г. / *И.П. Стамат* [и др.] // ФБУН Научно-исследовательский институт радиационной гигиены им. проф. П. В. Рамзаева. – СПб. 2012.
50. *Стамат И.П.* Отчет о НИР «Методическое обеспечение регулирования радиационной защиты населения от источников природного облучения». Контракт № № 9-3-14-2013 от 13 августа

- 2012 г / *И.П. Стамат [и др.]* // ФБУН Научно-исследовательский институт радиационной гигиены им. проф. П. В. Рамзаева. – СПб., 2013.
51. *Стамат И.П.* Отчет о НИР «Разработка предложений по формированию национального плана действий в части совершенствования инфраструктуры регулирования радонобезопасности населения». Контракт № 31401099476 от 25.04.2014 г./ *И.П. Стамат [и др.]* // ФБУН Научно-исследовательский институт радиационной гигиены им. проф. П. В. Рамзаева. – СПб, 2014.
52. *Стамат И.П.* Отчет о НИР «Информационно-аналитическое сопровождение работ по совершенствованию национальной стратегии обеспечения защиты населения от природных источников облучения» Контракт № 31502244842-43 от 10.04.2015 г. / *И.П. Стамат [и др.]* // ФБУН Научно-исследовательский институт радиационной гигиены им. проф. П. В. Рамзаева. – СПб., 2015.
53. *Маренный А.М.* Отчет о НИР «Формирование информационных ресурсов для оценки радоноопасности и разработки мероприятий по её снижению», Том 1 «Обследование населенных пунктов в Челябинской области и на обслуживаемых ФМБА России территориях на радоноопасность». Государственный контракт № 21.203.10.2 от 04 июня 2010 года / *А.М. Маренный [и др.]* // ФГУП НТЦ радиационно-химической безопасности и гигиены ФМБА России.– М., 2010.
54. *Маренный А.М.* Отчет о НИР «Проведение систематических обследований жилых и общественных зданий на содержание радона и разработка методических документов по обеспечению радонобезопасности строящихся зданий», Том 1 «Обследование населенных пунктов на территории Российской Федерации на содержание радона в помещениях». Государственный контракт № 21.006.11.2. от 24 мая 2011 года / *А.М. Маренный [и др.]* // ФГУП НТЦ радиационно-химической безопасности и гигиены ФМБА России.. – М., 2013.
55. National and Regional Surveys of Radon Concentration in Dwellings: Review of Methodology and Measurement Techniques (IAEA/AQ/33) // IAEA. – Vienna, 2013.

56. Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения // СП 2.6.1.1292-03. – Москва, 2003.
57. Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка земельных участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения в части обеспечения радиационной безопасности // МУ 2.6.1.2398-08. – Москва: 2008.
58. Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после окончания их строительства, капитального ремонта, реконструкции по показателям радиационной безопасности //МУ 2.6.1.2838-11. – Москва, 2011.
59. Оценка индивидуальных эффективных доз облучения за счет природных источников ионизирующего излучения // МУ 2.6.1.1088-02. – Москва, 2002.
60. Оценка доз облучения групп населения, подвергающихся повышенному облучению за счет природных источников ионизирующего излучения // МУ 2.6.1.2397-08. – Москва, 2008.
61. Определение индивидуальных эффективных доз облучения персонала от короткоживущих дочерних продуктов изотопов радона // МУ 2.6.1.12-01. – Москва, 2001.
62. Радон. Измерение объемной активности интегральным трековым методом в производственных, жилых и общественных помещениях // МВИ 2.6.1. 003–99. – 1999.
63. МР Выборочное обследование жилых зданий для оценки доз облучения населения. Утв. 29.08.00, № 11-2/206-09. – М. – 2009.
64. Сведения о дозах облучения населения за счет естественного и техногенного измененного радиационного фона // МР Форма федерального государственного статистического наблюдения № 4-ДОЗ.
65. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения // Строительные нормы и правила СНиП 11-02-96. – М. – 1997.

66. Свод правил по инженерным изысканиям для строительства. «Инженерно-экологические изыскания для строительства» // Свод правил СП 11-102-97. – М. –1997.
67. Допустимые уровни ионизирующего излучения и радона на участках застройки // МГСН 2.02-97. – 1997.
68. Требования по обеспечению радиационной безопасности при строительстве в Московской области // ТСН РБ-2003 МО. – 2003.
69. Обеспечение радиационной безопасности населения от воздействия природных радионуклидов при строительстве объектов в Пермской области // ТСН 22-303-2001. – 2001.
70. Радиационно-экологические изыскания для проектирования и строительства жилых и общественных зданий. Нижегородская область // ТСН 31-305-97 НН. – 1997.
71. Пособие по проектированию противорадоновой защиты жилых и общественных зданий // Пособие к МГСН 2.02-97. – 2012.
72. ВМУР1-97. Определение плотности потока радона на участках застройки.
73. Методика измерения плотности потока радона с поверхности земли и строительных конструкций. МИ ППР – НТЦ «Нитон». Согласовано с директором Центра метрологии ионизирующих излучений ГП ВНИИФТРИ Госстандарта РФ В.П. Ярыной. // Методика измерений. –1993.
74. Радон. Измерение объемной активности в воздухе помещений интегральным трековым методом (Свидетельство ФГУП ВНИИФТРИ № 40090.2И385 от 16 июля 2012 г.)// Методика измерений. – 2012.
75. *Губин А.Т.* Отчет о НИР «Превентивная стратегия обеспечения радонобезопасности населения» / *А.Т. Губин [и др.]* // ФГУП Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены. – М., 2013.
76. *Hůlka J.* Опыт реализации радоновой программы в Чехии // Презентация на рабочем совещании МАГАТЭ, 4–5 февраля. – М., 2014.

77. *Mäkeläinen I., Valmari T., Reisbacka H. et al.* Indoor Radon and Construction Practices in Finnish homes from the 20<sup>th</sup> to the 21<sup>st</sup> century. // Third European IRPA Congress, 2010 June 14–16. – Helsinki, Finland. – 2010.
78. *Long B.* US Federal Radon Action Plan, Center for Radon and Air Toxics, Office of Air and Radiation // US EPA, HERCA Workshop, ASN Paris 30 September 2014. URL: [www.epa.gov/radon](http://www.epa.gov/radon). – 2014.
79. *McBurney R.* How the U.S. Developed a National Radon Action Plan: Lesson Learned and Ideas to Consider (State and NGO Activities). // Conference of Radiation Control Program, HERCA. ASN Paris 30 September. – 2014.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая публикация имела целью обратить внимание на необходимость развития в Российской Федерации работ в области радиационной защиты населения от воздействия радона на основе современных рекомендаций, разработанных такими авторитетными международными организациями, как НКДАР ООН, ВОЗ, МКРЗ и МАГАТЭ, а также накопленного мирового опыта в их реализации. Основываясь на этой позиции, в книге в историческом аспекте представлены этапы развития радоновой проблемы. Рассматривая радон как радиационно опасный фактор окружающей среды, отмечается, что в Российской Федерации вклад в суммарные дозы облучения населения от природных источников ионизирующего излучения составляет в среднем 83 %, среди которых 60 % приходится на долю изотопов радона в воздухе жилых и общественных зданий. Средняя суммарная доза облучения населения за счет природных источников составляет 3,37 мЗв/год, при этом вклад радона составляет 1,96 мЗв/год. Около 1,1 млн. человек в стране имеет среднегодовые эффективные дозы природного облучения, превышающие 10 мЗв/год, что составляет половину годового дозового предела, установленного для работников атомной отрасли. По данным ВОЗ, в зависимости от средней объемной активности радона в помещениях доля радон-индуцированных раков легкого от общего числа всех раков легкого лежит в диапазоне от 3 до 14 %. Смертность от радон-индуцированного рака легкого является второй ведущей причиной смерти для курящих и первой для некурящих людей. Существуют предварительные оценки смертности от радон-индуцированного рака легкого в России, однако официальные статистические данные в стране отсутствуют. Таким образом, можно констатировать, что снижение облучения населения на национальном уровне является проблемой как радиационной защиты, так и общественного здравоохранения.

Для обеспечения радиационной безопасности населения при воздействии радона в Российской Федерации в настоящее время создана достаточно гармоничная нормативная база регулирования, имеется аппаратура для измерения его объемной активности, проводятся работы по обследованию помещений, позволившие определить радоноопасные регионы. Осуществляется изучение радиогенного фона земной поверхности, создана база данных по оценке доз облучения природными источниками излучения. Получили развитие превентивные меры по снижению облучения радоном в строящихся и реконструируемых зданиях. Во многом, развитие этих работ было связано с утверждением в 1993 г. «Федеральной целевой программы снижения уровней облучения населения России и производственного персонала от природных радиоактивных источников на 1994–1996 гг.». Реализация данной программы стимулировала все аспекты развития радоновой проблемы как на федеральном, так и региональном уровне. Однако из-за отсутствия финансирования программа вскоре была закрыта, а ее развитие осуществляется в стране в рамках отдельных мероприятий при отсутствии координации на федеральном уровне. Вместе с тем, новые данные об опасности облучения населения радоном в помещениях, полученные в ходе проведенных широкомасштабных эпидемиологических исследований и изданные на их основе современные рекомендации ВОЗ, МКРЗ и МАГАТЭ, ставят на повестку дня вопрос о разработке в России новых подходов к решению радоновой проблемы. На основе проведенного анализа эпидемиологических данных, детального рассмотрения положений указанных международных публикаций, а также изучения мирового опыта по их внедрению в практической деятельности предложены стратегические направления решения проблем ограничения облучения населения Российской Федерации радоном на современном этапе. Аргументирована приоритетная необходимость принятия на федеральном уровне долгосрочного национального плана действий, в рамках которого должна осуществляться реализация радоновой страте-

гии. Приведен перечень основных мероприятий национального плана, разработка которых базируется на рекомендациях международных организаций и современном состоянии дел в стране в области снижения радоновой опасности. В целом, представленные материалы служат научной основой для принятия решения о подготовке отечественной государственной радоновой программы, а ее утверждение на национальном уровне позволит консолидировать деятельность федеральных и региональных органов власти, научных и общественных организаций по снижению опасности облучения населения радоном.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

*Научное издание*

**РАДОН. ОТ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ К ПРАКТИКЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ**

Авторы: *С.М.Киселев*  
*М.В.Жуковский*  
*И.П.Стапат*  
*И.В. Ярмошенко*

Предисловие: *Л.А.Ильин*  
Редакция: *С.М.Киселев*  
Рецензенты: *А.М.Маренный*  
*И.П. Коренков*

Корректор: *М.Э. Чупрякова*  
*А.В. Жукова*

Компьютерная верстка и оформление:  
*И.В. Схерпениссе*

Подписано в печать 20.12.2016  
Формат 90x60/<sub>16</sub>. Печать офсетная  
Тираж 300 экз. Зак. №

ISBN 978-5-905926-11-2



9 785905 926112