

МКРЗ

Труды МКРЗ

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

Радиологическая защита
от облучения радоном

МОСКВА • 2015

МКРЗ

Труды МКРЗ

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

**Радиологическая защита
от облучения радоном**

МОСКВА • 2015



Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Государственный научный центр Российской Федерации –
Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна»
(ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России)



Труды МКРЗ

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

Радиологическая защита от облучения радоном

Редактор
К. Х. КЛЕМЕНТ

Помощник редактора
Н. Хамада

Авторы от МКРЗ:
Ж.-Ф. Лекомте, С. Соломон, Дж. Такала, Т. Юнг, П. Странд,
К. Мюрит, С. Киселев, В. Жуо, Ф. Шеннон, А. Янсенс

Редакторы русского перевода:
д.т.н., профессор М.В. Жуковский
к.ф.-м.н. И.В. Ярмошенко к.б.н. С.М. Киселев

В Публикации МКРЗ 126 представлена новая система регулирования радиологической защиты населения от радона, основанная на современных подходах, постулированных в публикации 103 МКРЗ. Научную основу регулирования составляют результаты эпидемиологических исследований риска возникновения рака легких от радона, выполненных методом случай-контроль в жилищах. Основной идеей публикации является разработка комплексного подхода к решению радоновой проблемы, заключающегося в формировании национальной стратегии и ее последовательной реализации в рамках радоновых программ, рассчитанных на долгосрочную перспективу. Издание приспособлено для специалистов по радиационной безопасности, радиобиологии, дозиметрии и читателей, интересующихся этими вопросами.

ОПУБЛИКОВАНО ДЛЯ
Международной комиссии
по радиологической защите издательством



Пожалуйста, ссылайтесь на это издание следующим образом:
ICRP, 2014. Radiological protection against
radon exposure. ICRP Publication 126. Ann. ICRP 43(3).

УДК 614.876...539.128.4

ББК 51.28+53.6

P 541

Ж.-Ф. Лекомте, С. Соломон, Дж. Такала, Т. Юнг, П. Странд, К. Мюрит, С. Киселев, В. Жуо, Ф. Шеннон, А. Янсенс

P541 Радиологическая защита от облучения радоном / под ред. М.В. Жуковского, И.В. Ярмошенко, С.М. Киселева // Перевод публикации 126 МКРЗ. Москва: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2015. – 92 с.

ISBN 978-5-903926-06-8

В Публикации МКРЗ 126 представлена новая система регулирования радиологической защиты населения от радона, основанная на современных подходах, постулированных в публикации 103 МКРЗ. Научную основу регулирования составляют результаты эпидемиологических исследований риска возникновения рака легких от радона, выполненных методом случай-контроль в жилищах. Основной идеей публикации является разработка комплексного подхода, основанного на формировании национальной стратегии обеспечения радонобезопасности населения и ее последовательной реализации в рамках национальных радоновых программ, рассчитанных на долгосрочную перспективу их реализации. Издание приспособлено для специалистов по радиационной безопасности, радиобиологии, дозиметрии и читателей, интересующихся этими вопросами.

Публикация 126 МКРЗ переведена и издана с разрешения Международной комиссии по радиологической защите

ISBN 978-5-9035926-06-8

УДК 614.876...539.128.4

ББК 51.28+53.6

© ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2015.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ	11
ПРЕДИСЛОВИЕ ПРИГЛАШЕННОГО РЕДАКТОРА	18
РАДИОЛОГИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ОТ ОБЛУЧЕНИЯ РАДОНОМ	21
Реферат	21
ПРЕДИСЛОВИЕ	22
РЕЗЮМЕ	25
ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ	33
ГЛОССАРИЙ	35
1. ВВЕДЕНИЕ	40
1.1. Общие сведения	40
1.2. Область применения	41
1.3. Структура	43
2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЛУЧЕНИЯ РАДОНОМ	45
2.1. Историческая справка	45
2.2. Источники и перенос радона	46
2.3. Риск от радона	49
2.4. Проблемы контроля облучения радоном	53
3. СИСТЕМА МКРЗ РАДИОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ОБЛУЧЕНИЯ РАДОНОМ	56
3.1. Ситуации облучения и категории облучения	57
3.2. Обоснование стратегий защиты	59
3.3. Оптимизация защиты	61
3.4. Применение пределов дозы	70
3.5. Резюме	71

СОДЕРЖАНИЕ

4. РЕАЛИЗАЦИЯ СТРАТЕГИЙ ЗАЩИТЫ	72
4.1. Национальный план действий	72
4.2. Предотвращение	75
4.3. Снижение облучения радоном	76
4.4. Строительные материалы	78
4.5. Защита работников	79
4.6. Защита от радона работников в уранодобывающей отрасли	80
4.7. Взаимодействие заинтересованных сторон	82
5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	84
ЛИТЕРАТУРА	86

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

В настоящее время большое внимание международных и общественных организаций уделяется обсуждению и разработке подходов к обеспечению защиты населения от природного радиоактивного газа радон. С радиологической точки зрения радон является доминирующим источником облучения населения. Его вклад в суммарную дозу облучения составляет более 50%. Оценивая медицинские последствия воздействия радона на организм человека, следует отметить, что Международное агентство по исследованию рака отнесло радон к соединениям, классифицируемым как канцероген для человека. В настоящее время убедительно продемонстрирована связь между раком легкого и облучением радоном в жилищах, при этом отмечено, что радон является вторым по значимости (после курения) фактором риска возникновения легочной онкопатологии. По разным оценкам авторитетных международных организаций, от 3 до 14% случаев рака легких обусловлено облучением населения дочерними продуктами распада радона в жилищах. Учитывая данные обстоятельства, ограничение облучения населения радоном является важной научно-практической задачей, решение которой в настоящее время выходит за рамки исключительно радиологических аспектов и приобретает широкое звучание в контексте общественного здравоохранения.

Облучение радоном относится к ситуации существующего облучения, поскольку его источником являются неизменные концентрации естественных радионуклидов в земной коре. Деятельность человека может создавать или изменять пути поступления радона, повышая его концентрацию внутри помещений по сравнению с фоном на открытой местности. Этими путями можно управлять с помощью профилактических или корректирующих действий. Именно контролируемость облучения радоном лежит в основе регулирования данной ситуации облучения, разработка стратегии и тактики которого является предметом рекомендаций и требований авторитетных международных организаций по радиационной безопасности.

Обращаясь к истории развития радоновой проблемы, следует отметить, что ее начало было положено еще в XVI в., когда была обнаружена

высокая смертность шахтеров в Центральной Европе. В конце XIX века было диагностировано заболевание – рак легкого и выдвинуто предположение о прямой связи развития легочной онкопатологии у шахтеров с воздействием радиоактивного газа. Результаты первых эпидемиологических исследований, проведенных в 60-х гг. прошлого столетия, подтвердили связь облучения шахтеров радоном с развитием рака легкого.

Интенсификация деятельности по добыче и переработке урана в середине XX в. остро поставила проблему обеспечения безопасности персонала урановых рудников от воздействия радона и инициировала разработку серии рекомендаций Международной комиссии по радиологической защите, основанных на установлении ограничений ингаляционного поступления радона в организм человека (МКРЗ 24, 32, 39, 47).

Позднее исследования, проведенные в жилых помещениях, показали, что радон вносит существенный вклад в облучение населения. Это привлекло особое внимание к проблемам обеспечения радонобезопасности населения и инициировало выпуск базовых рекомендаций МКРЗ по этому вопросу, изложенных в *Публикации 65* (МКРЗ 65, 1993).

В документе сформулирован единый подход к защите населения от радона в жилищах и на рабочих местах. Регулирование осуществлялось путем установления уровней действия (600 Бк/м^3 в жилищах и 1500 Бк/м^3 на рабочих местах), превышение которых диктовало необходимость применения мер по снижению содержания газа в помещениях. Таким образом, подходы МКРЗ базировались на концепции защиты наиболее облучаемых групп населения. В соответствии с рекомендациями МКРЗ и требованиями МАГАТЭ (1996) в различных странах были введены нормативы на содержание радона в жилищах. Важность проблемы регулирования облучения населения радоном была широко воспринята в различных странах мира, что, в свою очередь, инициировало проведение национальных радоновых обследований. Это позволило провести предварительные оценки масштабов радоновой проблемы и определить ее значимость на национальном уровне. В развитие рекомендаций МКРЗ в России в 1994 г. была принята Федеральная целевая программа «Радон», целью которой являлось формирование научно-методической, технической и организационной базы для нормализации радиационно-гигиенической и радиационно-экологической ситуации для наиболее облучаемых групп населения и неблагополучных по природным радионуклидам территорий России.

С момента выпуска *Публикации 65* прошло более 20 лет. За это время изменилось многое. Накоплен большой международный опыт регулирования данной проблемы, более детально проработана экспериментальная основа оценки рисков для здоровья, связанных с облучением населения

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

радоном, существенно изменилась система радиологической защиты. Эти обстоятельства обусловили необходимость пересмотра рекомендаций МКРЗ по радону с учетом современных реалий. В связи с этим на заседании Главной комиссии (6–16 ноября 2009 г.) в городе Порто (Португалия) была сформирована Рабочая группа с целью разработки новых рекомендаций по защите от радона взамен *Публикации 65*. В качестве научной и методической основы разрабатываемого документа использованы подходы, представленные в публикациях МКРЗ 65, 101 и 103 и заявлении Главной Комиссии по радону.

Одним из наиболее проблемных моментов *Публикации 65* являлось то, что основу оценки рисков от воздействия радона, составляли эпидемиологические исследования, полученные на когортах шахтеров урановых рудников, которые по ряду известных причин не могут быть перенесены на население. После выхода *Публикации 65* изучение эффектов воздействия радона на здоровье населения получило довольно интенсивное развитие. С 80-х гг. прошлого века в Европе, Северной Америке и Китае были проведены эпидемиологические исследования в жилищах, которые выполнялись по методу случай-контроль. При этом была проделана поистине гигантская работа по обеспечению необходимой статистической мощности исследований, оценке неопределенностей и мешающих факторов. Результаты этой деятельности позволили впервые провести прямую оценку риска для населения без необходимости экстраполяции параметров риска, полученных в исследованиях среди шахтеров. Эти результаты развития «радоновой проблемы» были проанализированы в рамках Международного радонового проекта, который был инициирован ВОЗ в 2005 г. Научный комитет по действию атомной радиации ООН (НҚДАР ООН) опубликовал научный доклад по оценке результатов проведенных эпидемиологических исследований, в котором указывается, что «в настоящее время представляется обоснованным принять оценку избыточного относительного риска, равную 0,16 на 100 Бк/м³, как подходящую, возможно консервативную, оценку (пожизненного) риска от радона в жилищах».

Учитывая результаты Международного радонового проекта ВОЗ, научные оценки НҚДАР ООН, МКРЗ выпустила *Публикацию 115* «Риск возникновения рака легкого при облучении радоном и продуктами его распада» (МКРЗ 115, 2010). В ней представлены результаты анализа эпидемиологических данных, на основе которых 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 результате было показано, что номинальный риск возникновения легочной

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

онкопатологии при облучении радоном в жилищах в два раза превышает аналогичный показатель, представленный в *Публикации 65*. Опираясь на эти данные, МКРЗ выпустило заявление по радону (Порто, ноябрь 2009 г), в котором рекомендовало снизить нормируемые значения по объемной активности радона в жилищах с 600 до 300 Бк/м³.

Результаты эпидемиологических исследований в жилищах послужили научной основой для пересмотра не только количественных показателей нормируемой величины, но и методологии защиты населения от данного компонента природного облучения.

В соответствии с новой системой радиологической защиты, постулированной в *Публикации 103* МКРЗ, 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. Концепция референтного уровня отличается от концепции уровней действия. По мнению МКРЗ и ВОЗ, подход, при котором меры по снижению радона в помещениях ранее рекомендовались только в случае превышения уровней действия (МКРЗ 65), создавал неверное представление, что воздействие ниже этого уровня является безопасным. Вместе с тем, результаты анализа объединенных эпидемиологических исследований в жилищах, проведенного в рамках радонового проекта ВОЗ, убедительно продемонстрировали следующее:

- риск рака легкого увеличивается линейно с долгосрочной радонной экспозицией (30 лет);
- нет свидетельств наличия порога;
- риск возрастает статистически значимо даже при умеренных содержаниях радона в жилых помещениях (50–100 Бк/м³).

Опираясь на эти данные, эксперты сходятся во мнении, что большинство случаев заболевания раком легкого, обусловленных радоном, вызваны скорее низкими и средними концентрациями радона, чем высокими.

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

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

оправданная мера выше и ниже референтного уровня, а не только когда он превышает. Это является краеугольным камнем современной методологии регулирования радоновой проблемы, изложенной в новой *Публикации 126 МКРЗ «Радиологическая защита от облучения радоном»*.

Основная идея современной стратегии регулирования заключается не только в снижении индивидуальных рисков, связанных с радоном, для наиболее облучаемых лиц, но и в последовательном снижении общего коллективного риска для всего населения. Учет современных международных рекомендаций требует пересмотра стратегии мер по ограничению облучения населения радоном.

Согласно новым требованиям МКРЗ национальным органам власти, ответственным за регулирование защиты населения от природных источников облучения, рекомендуется установить национальные референтные уровни с учетом превалирующих экономических и социальных условий, а затем применить процесс оптимизации защиты в своих странах. Значимое снижение коллективной дозы облучения населения радоном, сопровождающееся заметным снижением радониндуцированной онкологической заболеваемости, может быть достигнуто при планомерном снижении общего уровня облучения радоном в жилищах. Эта задача может быть решена путем формирования национальной стратегии защиты населения от источников природного облучения и разработке тактики ее решения в формате национального плана действий, рассчитанного на долгосрочную перспективу.

Спектр сторон, имеющих отношение к решению проблемы радона, широк и включает домовладельцев, работодателей, местные органы власти, строителей, архитекторов и специалистов в области здравоохранения. Поэтому реализация радоновой программы требует совместного участия государственных, региональных и местных организаций, отвечающих за здравоохранение, строительство и защиту от ионизирующего излучения. Ключевым элементом радоновой программы является развитие инфраструктуры взаимодействия между агентствами, организациями и экспертами, такими как научно-исследовательские институты, общественные или частные лаборатории, занимающиеся измерениями радона, инженеры и ученые строительного профиля, специалисты строительной промышленности.

В России вопросы обеспечения защиты населения от радона решаются свыше двух десятилетий совместными усилиями органов законодательной и исполнительной ветвей государственной власти, а также различными научно-исследовательскими организациями. В конце 1995 г. был принят Федеральный закон «О радиационной безопасности населения»,

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

в котором впервые на законодательном уровне были установлены нормы, направленные на ограничение облучения радоном и другими природными источниками. В развитие законодательных норм в России создана и функционирует система сбора и регистрации данных об уровнях облучения населения радоном и другими природными источниками излучения.

В период с 1994 по 2000 г. в стране действовала Федеральная целевая программа «Радон» по снижению уровня облучения населения России и производственного персонала от природных радиоактивных источников. С 2000 г. выполнение отдельных мероприятий этой программы было продолжено в составе комплексных федеральных целевых программ «Ядерная и радиационная безопасность России» и «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года».

Внедрение *Публикации 126 МКРЗ* позволит сделать новый шаг в развитии национальной системы радиологической защиты населения от воздействия радона в жилых помещениях и на этой основе использовать полученные в ходе выполнения федеральных целевых программ результаты в плане совершенствования национальной стратегии и формирования национального плана действий по данной проблеме.

С. М. Киселев,

кандидат биологических наук

ведущий научный сотрудник ФГБУ ГНЦ ФМБЦ

им. А. И. Бурназяна ФМБА России

ЛИТЕРАТУРА

1. Оценка канцерогенных рисков для человека. Монография. т. 43, Международное агентство по исследованию рака. Лион, 1988
2. Руководство по радону. ВОЗ, Женева, 2009
3. Якоби В. История радоновой проблемы в шахтах и жилых помещениях. МКРЗ 23(2), 39-45 (1993).
4. Радиационная защита в урановых и других шахтах. Публикация 24 МКРЗ. 1977
5. Пределы ингаляционного поступления дочерних продуктов распада радона для профессиональных работников. Публикация 32 МКРЗ, 1981 М.: Энергоатомиздат. 1984
6. Принципы нормирования облучения населения от естественных источников ионизирующих излучений. Публикация 39 МКРЗ. М.: Энергоатомиздат, 1986.

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

7. Радиационная защиты рабочих подземных шахт. Публикация 47 МКРЗ, 1986
8. Защита от радона-222 в жилых зданиях и на рабочих местах. Публикация 65 МКРЗ. М.: Энергоатомиздат, 1993.
9. Крисюк Э.М. Проблема радона - ведущая проблема обеспечения радиационной безопасности населения // АНРИ. – 1996/97. – N3(9). – С.13-16.
10. Оптимизация радиологической защиты. Публикация 101 МКРЗ. 2006.
11. Публикация 103 МКРЗ 2007 г. Пер. с англ. /Под общей ред. М.Ф. Киселёва и Н.К. Шандала. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009 – 312с.
12. Источники и эффекты ионизирующего излучения. Отчет НКДАР ООН 2000 года Генеральной Ассамблее с научными приложениями. Том 1: Источники (часть 1) // Пер. с англ., под ред. Акад. РАМН Л.А.Ильина и проф. С.П. Ярмоненко – М.: РАДЭКОН, 2002. – 308 с.
13. Публикация 115 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ) 2010 г. М.: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2013.
14. Радиологическая защита от облучения радоном. Публикация 126 МКРЗ. 2014.
15. Постановление Правительства Российской Федерации № 809 «О федеральной целевой программе снижения уровня облучения населения России и производственного персонала от природных радиоактивных источников на 1994-1996 годы» 1994.

ПРЕДИСЛОВИЕ ПРИГЛАШЕННОГО РЕДАКТОРА

РАДОН

Радиоактивный газ радон, повсеместно распространенный источник облучения, является признанной причиной рака легкого, второй после курения. Он присутствует во всех зданиях и подземных помещениях, хотя уровни накопления могут значительно различаться от места к месту в зависимости от геологических условий и типа здания. Для многих людей, включая некоторых работников, радон – основной фактор радиационного облучения.

Несмотря на свою важность, защита от радона была сравнительно поздно включена в свод рекомендаций Комиссии. В определенной степени это было связано с тем, что центральное место занимала защита от исключительно искусственных источников облучения, таких как ядерная энергия и использование источников в медицине.

Важный шаг вперед был сделан в 1991 г. с выходом в свет Рекомендаций Комиссии 1990 г. (ICRP, 1991), в которых обращалось внимание на необходимость защиты от природных источников облучения в жилищах и на рабочих местах. В развитие этого направления Комиссия выпустила *Публикацию 65* (ICRP, 1993) с рекомендациями по защите от радона-222. В этой публикации рассматривались основные подходы к защите, включая определение радоноопасных зон, необходимое для концентрирования ресурсов, и критерии, выраженные измеренными уровнями газообразного радона, которые должны использоваться при принятии решений о необходимости защитных мер. Для вмешательства были рекомендованы значения, соответствующие диапазону годовой эффективной дозы 3–10 мЗв при облучении в жилищах. Защита на рабочих местах рассматривалась отдельно от защиты в жилищах. Следует отметить, что хотя радон является источником внутреннего облучения, Комиссия рекомендовала не использовать дозиметрическую модель респираторного тракта человека для оценки и контроля облучения радоном. Вместо этого для перехода от экспозиции к эффективной дозе применялось прямое сравнение ущерба, связанного с единичной эффективной дозой и экспозицией (условный дозовый переход).

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

В 2007 г. Комиссия издала новые Рекомендации относительно системы радиологической защиты (ICRP, 2007). Новые требования развивали Рекомендации 1990 г. (ICRP, 1991) с тем, чтобы система защиты могла применяться для всех источников ионизирующего излучения независимо от их природы и размера. Особое значение придавалось принципу оптимизации защиты. В Рекомендациях 2007 г. (ICRP, 2007) различались три ситуации облучения: планируемого, аварийного и существующего. Облучение радоном в основном относится к ситуации существующего облучения, потому что источник облучения существует, когда принимается решение о контроле. Защита обеспечивается на основе применения референтного уровня и оптимизации.

В 2010 г. в *Публикации 115* были представлены обновленные оценки риска рака легкого, связанного с облучением радоном и его дочерними продуктами (ICRP, 2010). Было сделано важное заключение, что скорректированный на ущерб коэффициент номинального риска при облучении радоном вдвое превышает значение, которое предполагалось ранее. Этот доклад сопровождался Заявлением МКРЗ по радону, в котором среди прочего, с учетом новых данных о риске рака легкого, подвергалась ревизии верхняя граница референтного уровня для радона. Кроме этого декларировалось намерение Комиссии опубликовать дозовые коэффициенты для радона, рассчитанные с помощью дозиметрических моделей.

Примерно в это же время была сформирована Рабочая группа Комитета 4, которая должна была выработать принципы защиты от радона, соответствующие Рекомендациям 2007 г. и выводам доклада о риске рака легкого. Доклад, подготовленный Рабочей группой, публикуется в настоящем издании. Он представляет собой следующий шаг эволюции рекомендаций Комиссии по защите от радона. Этот доклад описывает и разъясняет применение принципов системы 2007 г. для защиты представителей населения и работников от облучения радоном в жилищах, на рабочих местах и в других типах помещений. Базируясь на предыдущих рекомендациях, этот доклад предлагает единый подход к защите от облучения радоном в зданиях независимо от их назначения и статуса их обитателей. Управление облучением радоном строится в основном на оптимизации и референтном уровне. Комиссия оставила в силе свою прежнюю рекомендацию относительно референтного уровня, равного примерно $10 \text{ мЗв} \cdot \text{год}^{-1}$ в единицах эффективной дозы. Определенные сложности возникли с принципами защиты от облучения на рабочих местах с высоким уровнем природной радиоактивности. Настоящий доклад рекомендует для рабочих мест последовательный подход, в соответствии с которым на начальном этапе используется тот же производный референтный уровень, что и для

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

других зданий и помещений. Если, несмотря на все разумные усилия, облучение превышает референтный уровень, следует применять требования системы защиты от профессионального облучения.

Настоящий доклад знаменует значительный шаг вперед в создании логичной системы защиты, в которой принцип оптимизации играет центральную роль и которую можно применять для всех источников и ситуаций. Стратегия защиты, представленная в этом докладе, может и должна стать базовой моделью действий в других случаях облучения высокими уровнями естественной радиоактивности.

Комиссия будет дальше работать, чтобы выработать законченную систему защиты от радона. В частности, в короткие сроки будут представлены дозовые коэффициенты для облучения радоном в различных условиях.

Джон Р. Купер,
бывший член Главной комиссии МКРЗ

ЛИТЕРАТУРА

1. ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1–3).
2. ICRP, 1993. Protection against radon-222 at home and at work. ICRP Publication 65. Ann. ICRP 23(2).
3. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37(2–4).
4. ICRP, 2010. Lung cancer risk from radon and progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115. Ann. ICRP 40(1).

РАДИОЛОГИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ОТ ОБЛУЧЕНИЯ РАДОНОМ

Публикация МКРЗ 126

Одобрена Комиссией в апреле 2014 г.

РЕФЕРАТ

В настоящем докладе Комиссия представляет обновленное руководство по радиологической защите от облучения радоном. Публикация была подготовлена с учетом недавно изданных Рекомендаций МКРЗ относительно системы радиологической защиты, всех научных знаний о риске от радона и опыта, накопленного многими организациями и странами по контролю облучения радоном.

Доклад описывает характеристики облучения радоном, охватывая источники и механизмы переноса, риск для здоровья, связанный с радоном, и проблемы контроля облучения радоном.

Для регулирования облучения радоном Комиссия рекомендует единый подход, основанный, насколько это возможно, на управлении зданием или местом, где происходит облучение радоном, независимо от предназначения здания. Этот подход основан на принципе оптимизации и последовательном подходе, который учитывает степень ответственности заинтересованных лиц, особенно в отношении рабочих мест, и намерения национальных властей по контролю облучения радоном.

В докладе представлены также рекомендации по регулированию облучения радоном на рабочих местах, когда облучение работников считается профессиональным, в этом случае следует применять соответствующие требования Комиссии.

Ключевые слова: облучение радоном, защита, жилые помещения, здания, рабочие места.

Авторы от имени МКРЗ

*Ж.-Ф. Лекомте, С. Соломон, Дж. Такала,
Т. Юнг, П. Странд, К. Мюрит,
С. Киселев, В. Жуо, Ф. Шеннон, А. Янсенс*

ПРЕДИСЛОВИЕ

На заседании в Порту (Португалия) в ноябре 2009 г., Главная комиссия Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) одобрила создание новой Рабочей группы, подотчетной Комитету 4, для разработки руководства по радиологической защите от облучения радоном.

Задача Рабочей группы состояла в подготовке публикации, которая опишет и разъяснит применение Рекомендаций Комиссии 2007 г. в части защиты от облучения радоном в жилищах, на рабочих местах и в иных помещениях. Публикация должна была представить характеристики данной ситуации существующего облучения и обсудить, в каких случаях облучение радоном является ситуацией планируемого облучения. Кроме этого, публикация должна была дать руководство по применению принципов радиологической защиты, включая соответствующие ограничения дозы и способ управления радоновым риском с помощью национального плана действий.

Публикация должна была быть разработана с учетом других, более ранних публикаций МКРЗ, имеющих отношение к данной теме: *Публикации 65* по защите от радона-222 в домах и на рабочих местах; части 2 *Публикации 101* по оптимизации радиологической защиты, *Публикация 103*, содержащей последние общие рекомендации МКРЗ, *Публикации 115* по риску возникновения рака легкого при облучении радоном и дочерними продуктами, которая включает Заявление Комиссии по радону, принятое в ноябре 2009 г., а также опыта многих организаций и стран по контролю облучения радоном.

Состав Рабочей группы:

Ж.-Ф. Леконт (председатель)

Дж. Такала

П. Странд

Т. Юнг

С. Соломон

В. Жуо

К. Мюрит

С. Киселев

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

Члены-корреспонденты:

Р. Чарвински (2009–2012) А. Янсенс Б. Лонг
С. Ниу Ф. Шеннон Т. Колган (2012–2013)

Рецензенты от Комитета 4:

Дж. Симмондс В. Целлер С. Лью

Основные рецензенты Главной Комиссии

Дж. Купер А. Гонсалес Дж. Харрисон Е. Вано
(2009–2012) (2009–2012) (2013) (2013)

Кроме того, Селин Батай и Сильвайн Андресш, секретари Рабочей группы, оказали ценную научную поддержку. Многочисленные полезные комментарии были также получены от Андре Пофийна, Людовика Вайллана, французской параллельной группы, нескольких экспертов Исполнительного агентства по общественному здравоохранению Англии (Великобритания), а также в ходе консультаций, организованных МКРЗ. Рабочая группа хотела бы поблагодарить всех этих лиц, а также СЕРН (Фонтене-Окс-Роз) за предоставленные возможности и поддержку во время совещаний.

Рабочая группа работала в основном по переписке и провела две встречи:

28 - 30 апреля 2010 г., СЕРН, Фонтене-Окс-Роз, Франция,
19 - 21 сентября 2010 г., СЕРН, Фонтене-Окс-Роз, Франция.

В состав Комитета 4 в период подготовки настоящего доклада входили:

(2009–2013)

Дж. Локард, председатель	М. Кай	К. Мрабит
У. Вейсс, зампредела	Х. Лью	С. Шинкарев
Ж.-Ф. Леконт, секретарь	С. Лью	Дж. Симмондс
Р. Бернс	С. Магнуссон	А. Зела
П. Карбонерас	Г. Массера	В. Целлер
Д. А. Кул	А. Мак-Гарри	

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

(2013–2017)

Д. А. Кул, председатель
Ж.-Ф. Леконт, секретарь
Ф. Бошуд
М. Бойд
А. Каноба
К-В. Чо

М. Доруф
Э. Галего
Е. Гомма
М. Кай
С. Лью
А. Мак-Гарри

А. Нисбет
Д. Отон
Т. Патер
С. Шинкарев
Дж. Такала

РЕЗЮМЕ

- (a) Цель настоящего доклада состоит в описании и разъяснении применения системы, разработанной Комиссией, для защиты населения и работников от облучения радоном в жилищах, на рабочих местах и в иных помещениях.
- (b) Существуют два основных изотопа радона. Радон-222 является продуктом радиоактивного распада радия-226, который присутствует в земной коре в различных концентрациях. Поскольку радон – газ, он способен поступать из почвы в помещения, его поступление зависит от различных факторов, таких как тип почвы, здания и/или помещения. Радон-220 – продукт радиоактивного распада радия-224 в цепочке распада тория-232, также присутствующего в земной коре. Как радон-222, так и радон-220 могут поступать из строительных материалов. Объемная активность радона в помещении может изменяться на несколько порядков величины от здания к зданию. В настоящем докладе рассматривается радон-222.
- (c) Поскольку радон инертен, почти весь вдыхаемый газ впоследствии выдыхается. Однако аэрозоли короткоживущих продуктов распада радона при вдыхании могут откладываться в респираторном тракте. В зависимости от диффузионных свойств аэрозолей продукты распада, присутствующие в воздухе, откладываются в носовых полостях, на стенках бронхов и в легких. Два из короткоживущих продукта распада, полоний-218 и полоний-214, излучают альфа-частицы. Энергия, передаваемая этими альфа-частицами, вносит основной вклад в облучение, которое может привести к отрицательным последствиям для здоровья.
- (d) В *Публикации 115* (ICRP, 2010) Комиссия выполнила тщательный обзор и анализ эпидемиологических исследований связи рака легких с облучением радоном. Как для шахт, так и для жилищ получены убедительные доказательства того, что радон и его дочерние продукты могут вызывать рак легкого. Комиссия для радиологической защиты рекомендовала скорректированный на ущерб коэффициент номинального риска рака легкого для взрослого населе-

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

- ния, состоящего из лиц обоего пола, курящих и некурящих: $8 \cdot 10^{-10}$ на Бк·ч·м⁻³ при облучении газообразным радоном-222 в равновесии с дочерними продуктами ($5 \cdot 10^{-4}$ на рабочий уровень в месяц, РУМ). Это значение примерно вдвое превышает прежнее значение, использованное Комиссией в *Публикации 65* (ICRP, 1993). Для других солидных опухолей, кроме рака легкого и лейкемии, в настоящее время нет убедительных данных о связи заболеваемости с облучением радоном и его дочерними продуктами.
- (e) В рамках системы радиологической защиты облучение радоном характеризуется признаками ситуации существующего облучения, поскольку источником является повсеместная, неизменная и изначально существующая естественная радиоактивность земной коры. Деятельность человека, такая как строительство зданий или эксплуатация рудников, может создавать или изменять пути поступления радона и его дочерних продуктов. Этими путями можно управлять с помощью превентивных или корректирующих действий. Сам источник, однако, не может быть изменен, так как уже существует, когда должно быть принято решение по контролю. В то же время на некоторых рабочих местах облучение радоном с самого начала может рассматриваться национальными властями как ситуация планируемого облучения. Такими рабочими местами являются урановые рудники, связанные с ядерным топливным циклом.
- (f) Маловероятно, чтобы радон привел к ситуации аварийного облучения, хотя обнаружение очень высокой объемной активности в каком-либо месте может потребовать срочного проведения защитных мероприятий.
- (g) Принципиальное отличие *Публикации 103* от *Публикации 60* состоит в том, в ней предложен согласованный подход к управлению всеми видами ситуаций облучения. Этот подход основан на применении принципа оптимизации, который реализуется с помощью соответствующих ограничений индивидуальных доз облучения: пределов дозы, или референтных уровней. Оптимизация предполагает снижение дозы ниже предела, или референтного уровня, насколько это разумно достижимо, независимо от начального уровня воздействия.
- (h) Повседневная жизнь или работа неизбежно связаны с облучением радоном. Как и во многих других ситуациях существующего облучения, воздействие радона может быть неоднородным. Уровни облучения в значительной степени зависят от поведения человека,

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

поэтому решающее значение имеют самостоятельные защитные действия. Мерам по управлению ситуации облучения должен предшествовать ее анализ. Управление облучением радоном в жилищах должно осуществляться с учетом целого ряда аспектов, таких как экологические, медицинские, экономические, архитектурные или образовательные, и вовлекать широкий круг заинтересованных лиц.

- (i) Регулирование облучения радоном в зданиях требует решения ряда проблем. Поскольку человек перемещается в пределах одной территории, то стратегия защиты от радона должна разрабатываться национальными органами и осуществляться на последовательной и единой основе независимо от типа помещения. Ввиду того что радоновый риск обусловлен главным образом облучением в жилых домах, то с точки зрения охраны здоровья населения политика в отношении радона должна быть направлена в первую очередь на жилища. В эпидемиологических исследованиях было продемонстрировано, что объемная активность радона во многих зданиях может превышать уровни, при которых обнаруживается риск для здоровья человека, поэтому необходимы меры по снижению как совокупного облучения всего населения, так и наиболее высоких индивидуальных уровней облучения. Политика в отношении радона должна быть простой, разумно соотноситься с другими опасностями для здоровья, поддерживаться и осуществляться на долгосрочной основе и с участием всех заинтересованных сторон.
- (j) Национальная политика в отношении защиты от радона должна обращаться к решению этих проблем с учетом юридической ответственности, в особенности ответственности конкретного домовладельца перед жителями, застройщика или продавца недвижимости перед покупателем, хозяина перед арендатором, работодателя перед работником и, вообще говоря, ответственного за любое здание лица перед его пользователями. Все эти факторы влияют на реализацию стратегии защиты от радона.
- (k) Такой диапазон ответственности приводит к тому, что в основу политики в отношении радона должны быть положены реализм и эффективность. Стратегия защиты от радона должна быть направлена на поддержание и/или снижение объемной активности радона до разумно достижимого низкого уровня, учитывая невозможность снизить содержание радона внутри помещений до нуля.
- (l) Комиссия считает, что национальная стратегия защиты от радона обоснованна в большинстве ситуаций, так как радон присут-

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

ствует повсеместно, является значимым источником радиационного облучения (вторая после курения причина рака легкого) и в большинстве обстоятельств может контролироваться. Кроме того, политика в отношении радона может положительно влиять на решение других проблем общественного здравоохранения, таких как курение и качество воздуха в помещениях. Национальным властям необходимо анализировать ситуацию, проводить оценку объемной активности радона и идентифицировать радоноопасные территории, а также определять приоритеты общественного здравоохранения и учитывать социально-экономические факторы, чтобы очерчивать рамки действий и реализовывать стратегию защиты от радона. Хотя абсолютный риск рака легкого в результате облучения радоном существенно выше для курящих, чем для некурящих, Комиссия рекомендует не делать различия между этими категориями населения при проведении радонозащитных мероприятий.

- (m) Анализ ситуации облучения также является необходимым условием применения принципа оптимизации. Данный принцип является ведущим при регулировании облучения радоном с целью поддержания или снижения объемной активности радона до разумно достижимого уровня с учетом основных экономических и социальных факторов. Так же, как при регулировании других источников облучения, Комиссия рекомендует ограничивать индивидуальные дозы облучения, обусловленные источником, в сочетании с оптимизацией защиты.
- (n) Как и для других источников облучения, национальные органы власти устанавливают национальные референтные уровни доз облучения и производные референтные уровни концентрации, проводят оптимизацию защиты в своих странах. Цель состоит в снижении как общего риска для всего населения, так и индивидуального риска наиболее облучаемых лиц. В обоих случаях процесс реализуется через управление зданиями, а не индивидуальной экспозицией, и должен привести к снижению объемной активности радона в воздухе помещения до разумно достижимого значения – ниже национального референтного уровня.
- (o) Облучением радоном можно управлять только воздействуя на пути его поступления. Физические лица получают выгоду от использования зданий, и им оказывается поддержка для снижения доз облучения. Исходя из вышеперечисленного, устанавливаемый референтный уровень должен соответствовать годовой дозе в

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

диапазоне от 1 мЗв до 20 мЗв, как это рекомендовано Комиссией для ситуаций существующего облучения (см. табл. 5 *Публикации 103*). Комиссия считает, что значение порядка 10 мЗв, принятое в *Публикации 65*, должно оставаться ориентиром для референтного уровня при облучении радоном.

- (p) В связи с тем, что регулирование облучения радоном применяется к зданиям, целесообразно устанавливать производные референтные уровни в терминах объемной активности радона в воздухе, которая является измеряемой величиной, выражаемой в беккерелях на кубический метр (Бк·м³). В *Публикации 103* Комиссия рекомендовала верхнюю границу для производного референтного уровня 600 Бк·м³ для жилищ и 1500 Бк·м³ для рабочих мест (ICRP, 2007). По результатам обзора эпидемиологических данных, представленного в *Публикации 115*, и с учетом повышения примерно в два раза номинального коэффициента риска, Комиссия снизила верхнюю границу референтного уровня в жилищах до 300 Бк·м³ в Заявлении, ассоциированном с этой публикацией (ICRP, 2010). Объемная активность радона 300 Бк·м³ в жилищах соответствует годовой дозе около 10 мЗв, если использовать условный дозовый переход и пересмотренное значение номинального коэффициента риска (*Публикация 115*). В Заявлении также упоминается уровень 1000 Бк·м³ в качестве отправной точки для применения требований защиты от профессионального облучения взамен верхней границы референтного уровня 1500 Бк·м³.
- (q) В Заявлении Комиссия проинформировала о своем намерении рассчитать дозовые коэффициенты для поступления радона и его дочерних продуктов, используя тот же подход на основе референтных биокинетических и дозиметрических моделей, который применяется к другим радионуклидам. С учетом новых дозовых коэффициентов объемная активность 300 Бк·м³ соответствует более высокой годовой дозе облучения в домах, но в пределах диапазона от 1 до 20 мЗв.
- (r) Для практической реализации стратегии защиты от радона Комиссия продолжает рекомендовать для радона-222 в жилищах верхнее значение производного референтного уровня 300 Бк·м³. Комиссия настоятельно призывает национальные власти установить национальный производный референтный уровень на разумно достижимом низком уровне в диапазоне от 100 до 300 Бк·м³ с учетом основных социально-экономических факторов. Это согласуется с Заявлением Комиссии в *Публикации 115* МКРЗ (ICRP,

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

2010) и Руководством ВОЗ по радону (WHO, 2009). При оценке соответствия производному референтному уровню измерение должно быть представительным для среднегодовой объемной активности радона в здании или помещении.

- (s) Учитывая, что люди перемещаются в течение суток с места на место в пределах одной и той же зоны и должны быть одинаково защищены независимо от местоположения, а также в целях упрощения Комиссия рекомендует для многофункциональных зданий с доступом как для населения, так и для работников применять то же значение верхнего предела $300 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$.
- (t) Комиссия рекомендует применять последовательный подход к регулированию облучения радоном. В рамках такого подхода стратегия защиты от радона должна начинаться с программы, нацеленной на то, чтобы побудить соответствующих лиц, принимающих решения, содействовать самостоятельным защитным действиям, таким как проведение измерений и при необходимости снижению облучения. Этот процесс может быть реализован с помощью информирования, консультаций, оказания помощи и предъявления более формальных требований. Применение и степень обязательности этих мероприятий зависит от характера юридической ответственности за ситуацию и целей национальной стратегии защиты от радона.
- (u) Специальный последовательный подход должен осуществляться на рабочих местах. Этот подход заменяет использование величины объемной активности радона $1000 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ в качестве отправного уровня для выполнения требований по охране труда. Когда облучение работников радоном не рассматривается как профессиональное облучение, например в офисных зданиях, первый шаг заключается в снижении объемной активности радона ниже производного референтного уровня, установленного для жилищ, насколько это разумно достижимо. Соответствующая годовая доза обычно ниже, чем в жилищах, т. к. время пребывания на рабочих местах обычно меньше времени, проводимого дома. Если на первой стадии встречаются трудности, то в качестве второго шага рекомендуется более реалистичный подход, состоящий в оптимизации защиты с учетом фактических параметров ситуации облучения, таких как время пребывания на рабочих местах, и референтного уровня годовой дозы 10 мЗв .
- (v) Если, несмотря на все разумные усилия по снижению облучения радоном, облучение на рабочих местах остается выше референтно-

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

го уровня, выраженного в единицах дозы, работники должны рассматриваться как профессионально облучаемые. В таких случаях Комиссия рекомендует применять соответствующие требования к профессиональному облучению (см.: ICRP, 2007, часть 5.4.1).

- (w) Комиссия также рекомендует применять такие требования на рабочих местах, на которых облучение работников радоном с самого начала рассматривается национальными властями как профессиональное. К таким рабочим местам относятся термальные курорты, пещеры и другие подземные рабочие места.
- (x) Независимо от того, рассматривается облучение работников как профессиональное или нет, оно должно быть ниже верхней граница диапазона для ситуаций существующего облучения (20 мЗв в год). Предел дозы профессионального облучения следует применять, когда национальные органы считают, что ситуация облучения радоном должна трактоваться как ситуация планируемого облучения.
- (y) Чтобы быть эффективной, национальная стратегия защиты от радона должна быть разработана на долгосрочную перспективу. Для существенного снижения риска от радона для населения в целом скорее всего потребуются несколько десятилетий согласованных усилий, а не лет. Комиссия считает, что следует различать предотвращение, нацеленное на удержание облучения на минимальном разумно достижимом уровне в сложившихся условиях, особенно в новых зданиях, и меры по снижению облучения до разумно достижимого минимального уровня в существующих зданиях.
- (z) Как следствие, стратегия защиты от радона должна содержать предупредительные меры. Независимо от местонахождения внутри здания, категории лиц и типа ситуации облучения проблема облучения радоном может быть рассмотрена на этапах планирования, проектирования и строительства здания. Предупредительные меры для новых зданий и при реконструкции старых осуществляются введением землеустроительных и строительных норм. Для достижения синергизма и исключения противоречий такой подход также подразумевает согласованную интеграцию стратегии защиты от радона с решением других проблем, касающихся зданий, таких как обеспечение качества воздуха в помещениях или экономия энергии.
- (aa) Часть национальной стратегии защиты от радона, направленная на снижение облучения, касается существующих зданий и помещений. Контроль облучения должен обеспечиваться, насколько

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

возможно в этом случае, через управление зданием или помещением и условиями его использования независимо от категории лиц, находящихся внутри здания. Основными этапами являются измерения и при необходимости – выполнение корректирующих мероприятий по снижению облучения.

- (bb) Для обеспечения выполнения национальной стратегии защиты от радона национальные органы власти с участием соответствующих заинтересованных сторон разрабатывают национальный план действий по радону. План действий должен установить общую схему с понятной инфраструктурой, определить приоритеты и сферы ответственности, а также описать последовательность мер по решению проблемы радона в стране. В зависимости от условий облучения в плане должны быть определены заинтересованные стороны, включая облучаемых лиц, а также те, кто должен оказывать поддержку и реализацию мероприятий плана, решать этические вопросы, в частности, связанные с ответственностью, обеспечивать информацию, методическое руководство и помощь, а также условия для устойчивого развития.
- (cc) В национальном плане действий также должны быть рассмотрены методы и протоколы измерений радона, национальные радионные обследования для выявления радоноопасных зон, методы снижения облучения радоном и их применимость в различных ситуациях, политика поддержки, включая информирование, обучение и участие заинтересованных сторон, а также оценка эффективности. Проблема общественных зданий и рабочих мест также должна быть рассмотрена на основе специального последовательного подхода, учитывающего юридическую ответственность. Национальный план действий, включая значение производного референтного уровня, должен периодически пересматриваться.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Люди облучаются радоном в домах, на рабочих местах и в многофункциональных зданиях. Вариабельность объемной активности радона обуславливает высокую степень неоднородности распределения уровней облучения. Облучение радоном вне зданий, как правило, не создает проблем.
- Имеются убедительные доказательства того, что облучение радоном и его дочерними продуктами может привести к раку легкого. Облучение радоном – вторая после курения причина рака легкого.
- Облучение радоном – это ситуация существующего облучения, поскольку источником является естественная радиоактивность земной коры, неизменная, повсеместная и существующая изначально. Управлять можно только путями поступления радона.
- Национальные власти должны проанализировать эту ситуацию облучения и разработать национальную стратегию защиты от радона. Поскольку облучение радоном происходит в основном в домах, то облучение в жилищах необходимо рассматривать как проблему общественного здравоохранения. Стратегия должна включать обязательства по снижению как совокупного облучения всего населения, так и наиболее высоких индивидуальных уровней облучения.
- Стратегия должна быть простой и реалистичной, комплексной и применимой для всех типов зданий, дифференцированной в зависимости от ситуации и ответственности, не различающей курящих и некурящих. Она должна сочетаться с решением других общественно важных проблем, таких как экономия энергии, курение и качество воздуха в помещениях.
- Стратегия защиты от радона должна включать как предупредительные меры в новых зданиях, так и корректирующие мероприятия по снижению облучения в существующих зданиях.

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

- Управление облучением радоном базируется в основном на применении принципа оптимизации и соответствующего референтного уровня. Этот уровень должен соответствовать годовой дозе в диапазоне от 1 до 20 мЗв, как рекомендовано Комиссией. Комиссия считает, что значение годовой дозы порядка 10 мЗв должно оставаться ориентиром для референтного уровня при облучении радоном.
- В целях практической реализации стратегии защиты от радона Комиссия продолжает рекомендовать в качестве верхнего значения производного референтного уровня среднегодовую объемную активность в жилищах 300 Бк·м⁻³. Такое же значение рекомендуется для всех других типов зданий и рабочих мест.
- Комиссия настоятельно призывает национальные власти установить национальный производный референтный уровень на разумно достижимом низком уровне в диапазоне от 100 до 300 Бк·м⁻³ с учетом основных социально-экономических факторов.
- На большинстве рабочих мест облучение радоном является побочным и не рассматривается как профессиональное. Комиссия рекомендует применять на рабочих местах особый последовательный подход, включающий следующие шаги:
 - (i) оптимизацию защиты с использованием общего производного референтного уровня для всех зданий и рабочих мест;
 - (ii) оптимизацию защиты с учетом фактических параметров ситуации облучения, таких как время пребывания на рабочих местах, и референтного уровня годовой дозы 10 мЗв;
 - (iii) применение требований к профессиональному облучению, когда, несмотря на все усилия, облучение остается выше референтного уровня по дозе.
- Требования к профессиональному облучению применяются на рабочих местах, на которых облучение работников радоном с самого начала рассматривается национальными властями как профессиональное.
- Предел дозы, установленный для работников, должен применяться, если национальные власти сочтут, что ситуация облучения радоном должна трактоваться как ситуация планируемого облучения.

ГЛОССАРИЙ¹

Дочерние продукты радона-220

В настоящем докладе термин «продукты распада радона-220» использован в более узком смысле – короткоживущие продукты распада от полония-216 до полония-212 или таллия-208.

Дочерние продукты радона-222

В настоящем докладе термин «продукты распада радона-222» использован в более узком смысле – короткоживущие продукты распада от полония-218 до полония-214. В некоторых случаях дочерние продукты радона названы «продукты распада радона».

Естественные радиоактивные материалы

Радиоактивный материал, не содержащий значимых количеств радионуклидов, за исключением радионуклидов естественного происхождения, а также материалы, в которых удельная активность радионуклидов естественного происхождения была изменена в результате каких-либо процессов.

Категории облучения

Комиссия рассматривает три категории облучения: медицинское, профессиональное и облучение населения.

Коэффициент равновесия

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

¹ В некоторых случаях переводы терминов, данные здесь, отличаются от приведенных в русскоязычном переводе *Публикации 103*, поскольку точнее соответствуют оригиналу. – *Прим. пер.*

Медицинское облучение

Облучение, которому подвергаются пациенты в ходе медицинской или стоматологической диагностики или лечения; лица, которые сознательно и добровольно обеспечивают их комфорт, ухаживают за пациентами, кроме тех лиц, для кого облучение является профессиональным; добровольцы, участвующие в программах биомедицинских исследований, предусматривающих их облучение.

Национальное радоновое обследование

Обследование, выполняемое с целью определить распределение объемной активности радона, которое является репрезентативным для облучения радоном населения страны в целом.

Облучение населения

Облучение, которому подвергаются представители населения от источников ионизирующего излучения, кроме профессионального или медицинского облучения.

Оперативное управление

Лицо или группа лиц, которые руководят, контролируют и оценивают организацию работы на самом высоком уровне. Используется множество различных терминов, например: руководитель, генеральный директор, исполнительный директор и исполнительная группа.

Оптимизация защиты

Определение уровня защиты, при котором с учетом экономических и социальных факторов обеспечивается разумно достижимый низкий уровень облучения, а также вероятности и величины потенциального облучения.

Последовательный подход

Применяется для системы контроля, такой как система регулирования или система безопасности. Процесс или метод, в котором строгость мер контроля и требований соразмерна вероятности, ожидаемым последствиям и уровню риска, связанному с потерей контроля.

Представитель населения

Любой индивид, который получает облучение, не являющееся профессиональным или медицинским.

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

Производный референтный уровень

Численное значение, выраженное некоторой операционной или измеряемой величиной, соответствующее референтному уровню, установленному по дозе.

Профессиональное облучение

Любое облучение работников, которому они подвергаются во время работы в ситуациях, которые могут быть обоснованно отнесены к сфере ответственности оперативного управления.

Путь облучения

Путь, по которому ионизирующее излучение или радионуклиды могут достигать человека и вызывать облучение.

Работник

Любое лицо, принятое работодателем на работу по найму с полной, частичной или временной занятостью, которое знает свои права и обязанности, связанные с выполняемой работой.

Работодатель

Организация, корпорация, товарищество, фирма, ассоциация, траст, поместье, государственное или частное учреждение, группа, политический или административный орган, либо любые другие лица, указанные в соответствии с национальным законодательством, с признанными ответственностью, обязанностями и обязательствами в отношении работника во время его/ее работы по взаимному согласию. Лицо, осуществляющее собственную предпринимательскую деятельность, рассматривается одновременно и как работодатель, и как работник.

Рабочий уровень за месяц

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

Рабочий уровень

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

Радоноопасная территория

Географическая область или административный район, который определяют по результатам обследований, свидетельствующим о значительно более высокой объемной активности радона, чем в других частях страны.

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

Риск относится к вероятности возникновения некоторого последствия (например, рака легкого). Термины, относящиеся к риску, сгруппированы ниже:

- **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)** рассчитывается по формуле:

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⁻³, на 100 Бк·м⁻³ или на Зв.

- **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.

Ситуации планируемого облучения

Ситуации, подразумевающие преднамеренное введение в эксплуатацию источников и их работу. Ситуации планируемого облучения могут приводить как к облучению, которое ожидалось (нормальные облучения), так и к непредвиденному облучению (потенциальное облучение).

Ситуация существующего облучения

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

Удельная потенциальная энергия альфа-излучения²

Объемная активность короткоживущих дочерних продуктов радона-222 или радона-220 в воздухе, выраженная в единицах энергии 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⁻³.

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.

² В русскоязычной специальной литературе часто используется термин «скрытая энергия». – *Прим. пер.*

1. ВВЕДЕНИЕ

1.1. Общие сведения

(1) Ранее Комиссия опубликовала рекомендации по защите от облучения радоном. В *Публикации 65* (ICRP, 1993) Комиссия выполнила обзор существующих знаний о влиянии вдыхаемого радона и его дочерних продуктов на здоровье и разработала базовый подход к регулированию облучения радоном как в жилищах, так и на рабочих местах, соответствующий опубликованным за два года до этого общим рекомендациям (ICRP, 1991).

(2) В части 2 *Публикации 101* (ICRP, 2006b) Комиссия модернизировала свои рекомендации по оптимизации радиологической защиты. Часть 2 *Публикации 101* (ICRP, 2006b) не содержит конкретных положений, касающихся облучения радоном, но подчеркивает важность принципа оптимизации радиологической защиты для всех ситуаций облучения и рекомендует расширить процесс с вовлечением заинтересованных лиц. В то же время Комиссия пересмотрела свои общие рекомендации в *Публикации 103* (ICRP, 2007), в которой один раздел посвящен радону в жилищах и на рабочих местах. В этом разделе в целом подтверждаются рекомендации *Публикации 65* (ICRP, 1993) и вводится понятие «референтный уровень» взамен понятия «уровень действия».

(3) В 2009 г. Комиссия рассмотрела имеющуюся научную информацию о риске, связанном с радоном, и приняла заявление с кратким изложением обновленной позиции в отношении облучения радоном в домах и на рабочих местах с пересмотренными значениями ущерба и референтных уровней. Заявление МКРЗ по радону было опубликовано совместно с *Публикацией 115*, посвященной обзору материалов по риску рака легкого, связанного с радоном и его дочерними продуктами (ICRP, 2010).

(4) С момента выхода *Публикации 65* (ICRP, 1993) многие страны приобрели опыт в реализации политики по контролю облучения радоном. Кроме того, международные организации представили научную информацию и рекомендации по этому вопросу. Так, Научный комитет по действию атомной радиации ООН (НКДАР ООН) опубликовал доклад о радоновом облучении и рисках (UNSCEAR, 2009), а Всемирная организация

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

здравоохранения (ВОЗ) опубликовала руководство, касающееся регулирования облучения радоном в помещениях с точки зрения общественного здоровья (WHO, 2009). Позже ключевые рекомендации Заявления МКРЗ по радону были включены в международные и европейские базовые стандарты безопасности (IAEA, FAO, ILO, OECD/NEA, PAHO, UNEP, WHO, 2011; EURATOM, 2014).

(5) Цель настоящего доклада состоит в обновлении и пересмотре рекомендаций по контролю облучения от радона с учетом перечисленных публикаций и накопленного опыта. Учитывается также то, что в других публикациях МКРЗ будут подробно представлены пересмотренные дозовые коэффициенты для ингаляционного и перорального поступления радионуклидов, в том числе радона и его дочерних продуктов.

1.2. Область применения

(6) Радон является радиоактивным продуктом распада урана-238, урана-235 и тория-232. В ряду урана-238 образуется изотоп радон-222, являющийся прямым продуктом распада радия-226 (рис. 1.1). В ряду урана-235 образуется изотоп радон-219 (рис. 1.2). В ряду тория-232 образуется изотоп радон-220, прямой продукт распада радия-224 (рис. 1.3). Облучение человека радоном происходит в основном за счет радона-222, точнее, его короткоживущих дочерних продуктов. Из-за короткого периода полураспада радона-220 облучение в связи с его присутствием в воздухе внутри помещений, как правило, менее значимо. Вклад радона-219 в облучение ничтожный, поскольку миграция при таком коротком периоде полураспада незначительна, поэтому этот изотоп не рассматривается в данной публикации.

(7) Люди подвергаются воздействию радона-222 и радона-220 в жилищах как представители населения или на рабочих местах как работники. Люди облучаются радоном также в общественных местах, частных владениях, открытых для общественности, таких как административные здания, почтовые отделения, школы, больницы, дома престарелых, тюрьмы, магазины и развлекательные заведения, либо как представители населения (например, покупатели, пользователи, гости, ученики), либо как работники (например, персонал, вахтеры, торговцы, руководство, охрана, учителя, медсестры). Некоторые работники могут быть жителями, например, смотрители зданий. Настоящий доклад применим к контролю облучения радоном-222 в любом месте и для всех индивидов. Рекомендации, связанные с радоном-220, который создает меньше проблем для здоровья, в основном сосредоточены на положениях, касающихся строительных материалов (см.: раздел 4.4).

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

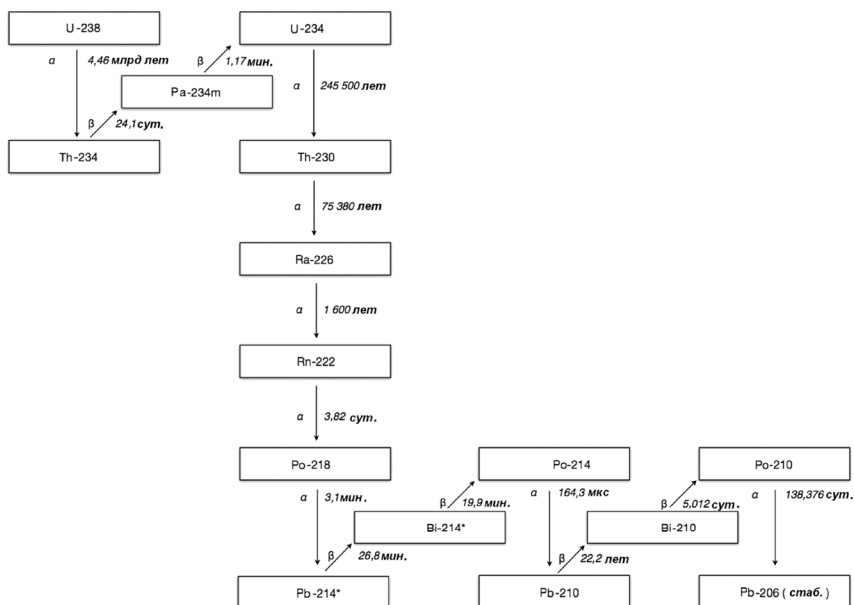


Рис. 1.1. Продукты распада U-238.

**Изотоп является интенсивным гамма-излучателем*

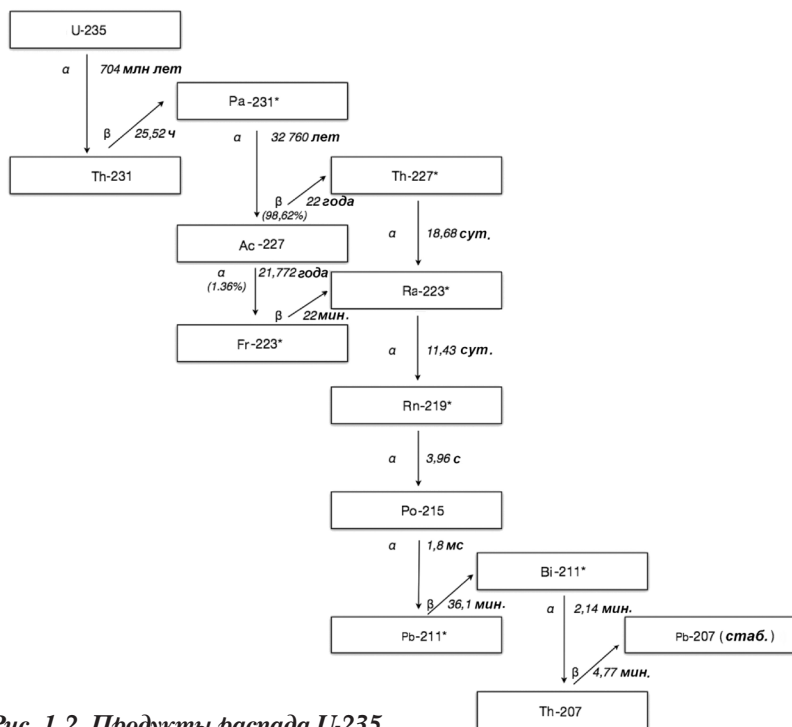


Рис. 1.2. Продукты распада U-235.

**Изотоп является интенсивным гамма-излучателем*

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

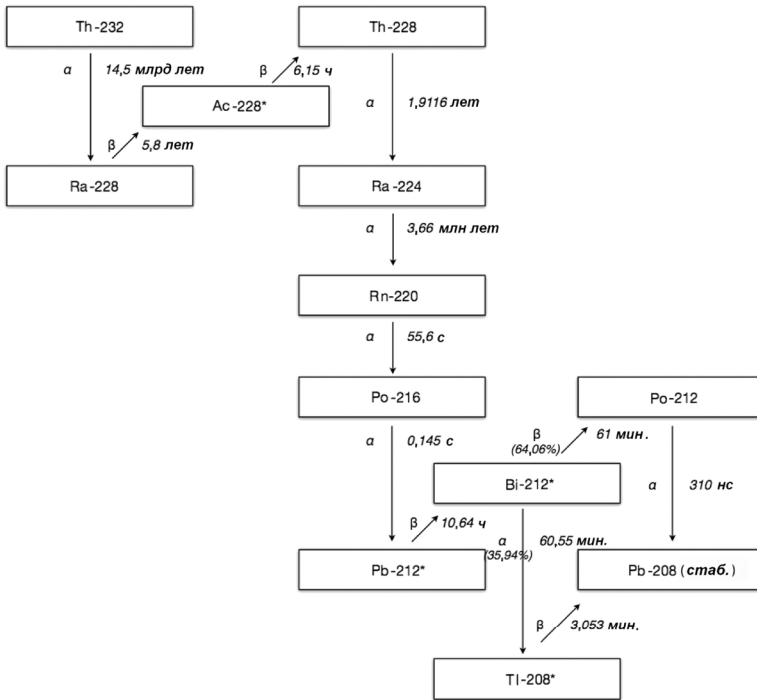


Рис. 1.3. Продукты распада Th-232

**Изотоп является интенсивным гамма-излучателем*

(8) Целью настоящего доклада является описание и разъяснение применения разработанной Комиссией системы защиты от облучения радоном населения и работников, облучение которых не считается профессиональным. Центральное место в этой системе занимает управление зданиями, такими как жилища, многофункциональные здания и большинство рабочих мест. Не представлены никакие новые рекомендации для контроля индивидуального облучения на тех рабочих местах, где облучение работников является профессиональным, например, на урановых рудниках.

1.3. Структура

(9) В разделе 2 представлены характеристики облучения радоном, в основном радоном-222. В нем приводится краткая историческая справка по проблеме облучения радоном-222 с описанием источников и механизмов переноса радона, а также природы и количественных оценок рисков

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

для здоровья, связанных с ним. Также изложены основные трудности при разработке национальной стратегии защиты от радона.

(10) В разделе 3 представлена система защиты от облучения радоном. После разъяснений о том, как поступать с категориями лиц, подвергающихся облучению в различных типах ситуаций облучения, три раздела посвящены обоснованию стратегии защиты, оптимизации защиты и применению пределов дозы, когда это необходимо.

(11) Рекомендации по осуществлению стратегии защиты от облучения радоном в зависимости от ситуации даны в разделе 4. Раздел 4.1 посвящен мерам регулирования облучения в зданиях, осуществляемым согласно национальному плану действий. Разделы 4.2 и 4.3 касаются мер по предупреждению и снижению облучения. В разделе 4.4 рассматриваются строительные материалы. Разделы 4.5 и 4.6 посвящены соответственно защите от радона работников обычных рабочих мест и урановых рудников. Последний раздел 4.7 касается вопросов взаимодействия с заинтересованными лицами.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЛУЧЕНИЯ РАДОНОМ

2.1. Историческая справка

(12) Высокая смертность шахтеров Центральной Европы была установлена до XVII в., а рак легкого как основная причина их смерти была определена в конце XIX в. (Haerting и Hesse, 1879). В 1924 г. было высказано предположение, что эти случаи рака легкого могут быть связаны с воздействием радона (Ludewig и Lorenzer, 1924).

(13) Эти первые наблюдения стали стимулом для проведения измерений радона. Ранее такие измерения ограничивались в основном исследованиями различных явлений в окружающей среде, таких как атмосферное электричество, атмосферный перенос и эксхалиция газов из почвы. В 1950-х гг. были разработаны программы мониторинга облучения дочерними продуктами радона в урановых рудниках для контроля облучения работников.

(14) Первые измерения радона в помещениях были выполнены в 1950-х гг. (Hultqvist, 1956), но привлекли мало внимания. Однако с 1970-х гг. в некоторых странах стали отмечать увеличение количества измерений повышенных уровней объемной активности радона в жилищах. В течение последующих десяти лет во многих странах были выполнены всесторонние радоновые обследования в жилищах и на рабочих местах, реализованы стратегии управления облучением радоном.

(15) Радон был формально признан причиной рака легкого в 1986 г. (WHO, 1986; IARC, 1988). В то время основным источником информации о рисках рака легкого, связанного с воздействием радона, были эпидемиологические исследования шахтеров (ICRP, 1993).

(16) После 1990-х гг. в нескольких исследованиях были получены важные данные о рисках при низких уровнях облучения, которые показали более высокие величины риска от радона при хроническом облучении (например, Lubin и др., 1997; NRC, 1998; EPA, 1999, 2003; Tomášek и др., 2008). Кроме того, проведенные недавно работы по объединенному анализу данных о раке легкого, полученных в исследованиях облучения радоном в жилищах методом случай-контроль, продемонстрировали повышенные

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

риски при низких уровнях облучения (Lubin и др., 2004; Darby и др., 2005, 2006; Krewski и др., 2006).

(17) Более подробный исторический обзор регулирования облучения радоном дается в *Публикации 65 МКРЗ* (ICRP, 1993).

2.2. Источники и перенос радона

(18) Радон-222 – радиоактивный продукт распада урана-238, который присутствует в земной коре в различных концентрациях (на уровне нескольких частей на миллион), имеет период полураспада 3,82 суток и является прямым продуктом распада радия-226.

(19) В ходе радиоактивного распада образующиеся продукты, как правило, остаются в породе, где происходил распад атомов. В случае, когда продуктом распада является атом газа, он способен перемещаться. Если атом образовался в поровом пространстве рядом с трещиной или разрывом в породе, то он может двигаться от места его образования. В почвенном воздухе содержится большое количество радона, объемная активность, измеренная на глубине 0,5–1 м ниже поверхности почвы, составляет от 2000 до 10^6 Бк·м⁻³ (Cothorn и Smith, 1987; Winkler и др., 2001). Радон в поровых пространствах переносится в основном путем диффузии при скорости переноса, зависящей от пористости и проницаемости почвы, или путем конвекции при наличии трещин и разломов. Перемещение растворенного радона через грунтовые воды – еще один значимый механизм переноса.

(20) До своего распада некоторое количество газообразного радона может переходить из почвы в атмосферу. Количество радона, эманлирующего из почвы, как правило, мало, и радон быстро разбавляется в воздухе. Степень разбавления зависит от устойчивости атмосферы, наличия ветра и уровня турбулентности (обусловленного вертикальным градиентом температуры). Поэтому объемная активность радона-222 в атмосферном воздухе обычно низка, но изменчива. Результаты измерений над землей варьируют от 1 до 100 Бк·м⁻³. Типичные уровни радона-222 в наружном воздухе примерно 10 Бк·м⁻³, более низкие уровни – на побережьях и на небольших островах (UNSCEAR, 2000, 2009).

(21) Радон-220 является радиоактивным продуктом распада тория-232, который присутствует в земной коре в различных концентрациях. Радон-220 имеет гораздо более короткий период полураспада ($T_{1/2} = 55$ с) по сравнению с радоном-222, поэтому он не удаляется значительно от своего источника. Его поведение в окружающей среде весьма отличается от

поведения радона-222. Основным источником поступления радона-220 в воздух помещений – строительные материалы. Наблюдается значительная вариабельность объемной активности газообразного радона-220 от места к месту. В целом средние уровни радона-220 газа в помещениях в различных странах находятся в диапазоне от 0,2 до 12 Бк·м⁻³ (UNSCEAR, 2000, 2009). Обычно облучение радоном-220 не создает проблем для радиологической защиты, за исключением частных случаев, таких как некоторые традиционные жилища.

(22) В то время как объемная активность радона, поступившего из почвы, быстро разбавляется в наружном воздухе, в закрытых помещениях этого не происходит (рис. 2.1). В зависимости от скорости вентиляции газообразный радон может накапливаться в здании по сравнению с наружным воздухом. В зависимости от метеорологических параметров и, в частности, от разницы температур воздуха снаружи и внутри здания имеется перепад давления между грунтом и фундаментом здания. Это вызывает усиленный приток богатого радоном почвенного воздуха, который зависит от проницаемости перекрытия, опирающегося на грунт, и вентиляции пространства под плитой перекрытия, если таковое существует. Этот обусловленный давлением поток обычно гораздо более важен, чем диффузионный перенос радона. При отсутствии разницы давления диффузионный перенос радона уменьшается из-за более высокой плотности материала фундамента по сравнению с поверхностью почвы.

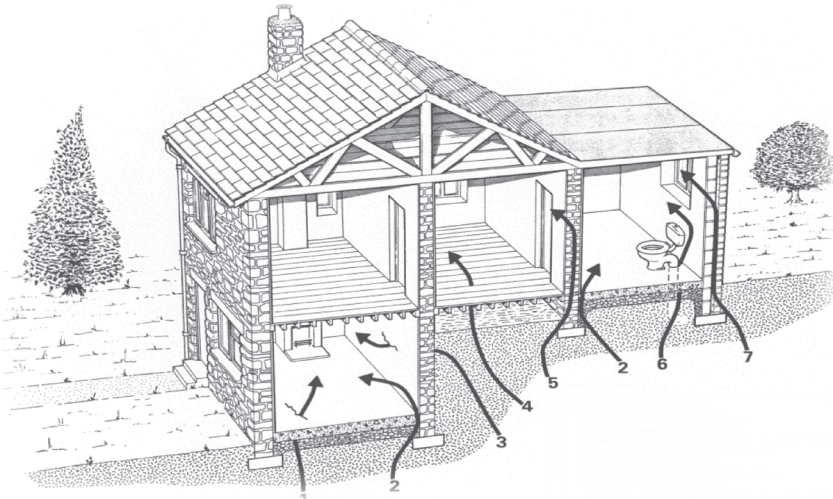


Рис. 2.1. Пути поступления радона в здание:

1 – трещины в основании, 2 – конструктивные швы, 3 – трещины ограждающих конструкций подвала, 4 – щели в полу, 5 – щели в стенах, 6 – зазоры коммуникационных каналов, 7 – полости в стенах

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

(23) Перенос радона из почвы в здания зависит от нескольких параметров:

- состав грунта (химический состав, геология, влажность и проницаемость для радона);
- объемная активность радона в грунте;
- перепады давления между внутренним и наружным воздухом, между почвой и окружающей здание атмосферой и между почвой и нижними помещениями здания;
- площадь здания, соприкасающаяся с грунтом;
- герметичность внешней оболочки здания, включая наличие трещин, трубопроводов и кабельных каналов и т. д., особенно в полах и фундаментах здания.

(24) Перенос радона в зданиях также зависит от нескольких факторов:

- циркуляции воздуха в здании, обусловленной вентиляцией и кондиционированием воздуха;
- метеорологических и сезонных параметров, главным образом разницы температур между внутренним и наружным воздухом;
- этажа и размера помещений;
- образа жизни и поведения на рабочих местах лиц, находящихся в здании (открывание дверей и окон и др.).

(25) Строительные материалы различаются по содержанию урана и тория. Радон может выделяться из этих материалов в воздух. Выделяющаяся активность зависит от скорости образования радона и пористости материала. Для обычных строительных материалов объемная скорость поступления составляет от 0,05 до 50 Бк·(м³·ч)⁻¹, соответствующая объемная активность – от 0,03 до 30 Бк·м⁻³ (для средней кратности воздухообмена 0,7 ч⁻¹). Но существуют ситуации, когда объемная активность радона может достигать 1000 Бк·м⁻³ (например, в случае бетона с высокой концентрацией радия). Однако в большинстве случаев этот источник радона имеет второстепенное значение по сравнению с проникновением радона из почвы (ЕС, 1999).

(26) Удельная активность радона в подземных водах изменяется значительно и может быть относительно высокой, несмотря на плохую растворимость радона в воде. Диапазон значений этой величины составляет от единиц до нескольких десятков тысяч беккерелей на литр (Skeppström

and Olofsson, 2007). Для некоторых частных колодцев, скважин и родников наблюдались относительно высокие удельные активности радона. Когда вода, содержащая радон, используется для домашнего водоснабжения, газ может выделяться в воздух, обуславливая повышенные уровни. Уровни радона в большинстве коммунальных систем водоснабжения в целом относительно низки из-за уменьшения количества радона в результате распада или дегазации при транспортировке.

(27) Каким бы ни был источник радона (почва, строительные материалы или вода), объемная активность радона в зданиях, по данным НКДАР ООН, может различаться на несколько порядков: от $10 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ до $70000 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ (UNSCEAR, 2009). Среднемировое значение объемной активности радона в помещениях составляет примерно $40 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$.

2.3. Риск от радона

(28) Оценка риска при облучении радоном традиционно базируется на эпидемиологических исследованиях, включающих главным образом наблюдения за шахтерами урановых рудников. Этот подход позволяет проводить расчеты относительного риска на единицу экспозиции, выраженную РУМ, $\text{Дж}\cdot\text{ч}\cdot\text{м}^{-3}$ или $\text{Бк}\cdot\text{ч}\cdot\text{м}^{-3}$. В *Публикации 65* (ICRP, 1993) был предложен условный дозовый переход, основанный на прямом сравнении ущерба на единицу экспозиции по радону и его дочерним продуктам и общего ущерба, связанного с единичной эффективной дозой. Первый был определен по эпидемиологии шахтеров, а последний по результатам эпидемиологических исследований японцев, выживших после атомной бомбардировки, подвергшихся в основном внешнему гамма-облучению. Такое сравнение позволило рассчитать дозу на единичную экспозицию, выраженную РУМ, $\text{Дж}\cdot\text{ч}\cdot\text{м}^{-3}$ или $\text{Бк}\cdot\text{ч}\cdot\text{м}^{-3}$, и установить уровень действия, выраженный $\text{Бк}\cdot\text{ч}\cdot\text{м}^{-3}$. Для всех других радионуклидов эффективная доза рассчитывается с применением биокинетических и дозиметрических моделей и определенных взвешивающих коэффициентов излучения и тканевых коэффициентов. В *Публикации 115* (ICRP, 2010) Комиссия заявила о своем намерении включить радон вместе с другими радионуклидами в будущие расчеты дозовых коэффициентов.

2.3.1. Эпидемиологические доказательства

(29) В Руководстве по радону в жилищах (WHO, 2009) ВОЗ оценила эффекты облучения радоном в жилищах для здоровья и сделала следующие выводы:

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

- 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.
- Согласно оценкам в зависимости от средней объемной активности радона в стране и от метода расчета доля всех обусловленных радоном случаев рака легкого лежит в диапазоне от 3 до 14%.
- Во многих странах радон является второй по значимости причиной рака легкого после курения. Радон с гораздо большей вероятностью вызывает 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 по объемной активности, ниже которого радоновое облучение не представляет никакой опасности. Даже низкие объемные активности радона могут привести к небольшому увеличению риска развития рака легкого.

(30) В Публикации 115 (ICRP, 2010) по риску рака легкого, связанному с облучением радоном и его дочерними продуктами, Комиссия выполнила тщательный обзор и анализ эпидемиологии радона как для работников (шахтеры), так и для всего населения. Основные выводы анализа были следующими:

- Имеются убедительные доказательства, полученные в когортных исследованиях шахтеров и в исследованиях случай-контроль в жилищах, что радон и его дочерние продукты могут являться причиной рака легкого. Для других солидных опухолей, кроме рака легкого, а также для лейкемии, в настоящее время нет убедительных и непротиворечивых доказательств связи заболевания с облучением радоном и его дочерними продуктами.
- Надлежащее сравнение оценок риска возникновения рака легкого из исследований облучения радоном в шахтах и жилищах хорошо согласуется. Три объединенных исследования случай-контроль в жилищах (в Европе, Северной Америке и Китае) дали сходные результаты. После коррекции на случайные погрешности измерений объемной активности радона европейское объединенное исследование случай-контроль в жилищах дало значение дополнительного относительного риска, равное 16% (95% доверительный интервал: 5–32%) на 100 Бк·м³ (Darby et al., 2005).

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

Это значение можно рассматривать в качестве обоснованной оценки для управления риском при относительно низких уровнях продолжительного облучения радоном в домах, учитывая, что этот риск связан с периодом облучения, равным по меньшей мере 25 годам.

- Общий риск возникновения рака легкого к возрасту 75 лет, рассчитанный для никогда не куривших, составляет 0,4, 0,5 и 0,7% при объемных активностях радона 0, 100 и 400 Бк·м³ соответственно. Накопленный риск заболеть раком легкого к 75 годам для куривших на протяжении всей жизни составляет около 10, 12 и 16% при объемных активностях радона 0, 100 и 400 Бк·м³ соответственно (Darby et al., 2005, 2006). Курение остается основной причиной рака легкого.
- Основываясь на обзоре эпидемиологических исследований облучения шахтеров, в том числе на исследованиях, в которых рассматривались относительно низкие уровни облучения, принимается скорректированное на ущерб значение номинального коэффициента риска, нормированного на единицу экспозиции $5 \cdot 10^{-4}$ на РУМ (0,14 на Дж·ч·м⁻³). Это значение – результат последних исследований, учитывающих облучение, полученное во взрослом возрасте, и оно почти в два раза превышает значение, рассчитанное в *Публикации 65* (ICRP, 1993).

(31) В результате этого обзора Комиссия рекомендует в своем Заявлении по радону коэффициент номинального риска с поправкой на ущерб $8 \cdot 10^{-10}$ на Бк·ч·м⁻³ для населения всех возрастов (взрослое население, состоящее из лиц обоего пола, курящих и некурящих) при облучении газообразным радоном-222 в равновесии со своими дочерними продуктами (ICRP, 2010). Выводы Комиссии согласуются с другими обстоятельными оценками, в том числе представленными Генеральной Ассамблее НКДАР ООН (UNSCEAR, 2009).

2.3.2. Дозиметрический подход

(32) Эквивалентная и эффективные дозы вследствие ингаляции дочерних продуктов радона могут быть рассчитаны с использованием референтных биокинетических и дозиметрических моделей МКРЗ, включая Модель респираторного тракта человека (ICRP, 1994, 2014a), Модель пищеварительного тракта человека (ICRP, 2006a) и системные биокинетические модели для полония, свинца и висмута (ICRP, 2014b). Для радона также была разработана системная биокинетическая модель. Таким образом

могут быть рассчитаны эффективные дозы, обусловленные ингаляцией газообразного радона (ICRP, 2014b).

(33) Радон-222 распадается с образованием одного атома негазообразного полония-218. В свою очередь, этот атом распадается на другие радионуклиды, как показано на рис. 1.1. Короткоживущие продукты распада радона (^{218}Po , ^{214}Pb и ^{214}Bi) находятся в воздухе в виде неприсоединенных радионуклидов и присоединенных к аэрозольным частицам, при этом доля неприсоединенной фракции зависит от условий в помещении. Дочерние продукты радона могут удаляться при осаждении на поверхностях или вентиляции.

(34) Вследствие того, что радон является инертным газом, почти весь он после вдыхания в дальнейшем выдыхается. Однако большая часть дочерних продуктов радона после вдыхания отлагается в дыхательных путях легких. Из-за относительно коротких периодов полураспада легочная ткань получает дозу облучения до их удаления путем абсорбции в кровь или переноса частиц в пищеварительный тракт. Два из этих короткоживущих дочерних продуктов, полоний-218 и полоний-214, испускают альфа-частицы, чья поглощенная энергия доминирует в дозе на легкие, в отличие от системных органов и желудочно-кишечного тракта, дозы облучения которых являются невысокими. Как следствие, эквивалентная доза облучения легких вносит более 95% в величину эффективной дозы, обусловленной ингаляцией дочерних продуктов радона. Эффективная доза от ингаляции только газообразного радона обычно ниже 10% ингаляционного поступления дочерних продуктов радона.

(35) Дозы зависят главным образом от объемной активности дочерних продуктов радона, продолжительности облучения, скорости дыхания и характеристик аэрозолей, включая распределение активности по размерам аэрозолей дочерних продуктов радона и неприсоединенной фракции. Если облучение оценивается по результатам измерений газообразного радона, то для расчета объемной активности дочерних продуктов радона в воздухе необходимо использовать значение коэффициента равновесия, F . Для целей радиологической защиты большинство параметров дозиметрических моделей, таких как скорость дыхания, соответствуют значениям для референтного работника или референтного человека. Для дозиметрической модели Комиссией, рассмотрены две ситуации профессионального облучения: в шахте и на обычном рабочем месте в помещении (ICRP, 2014b). Рассчитанные дозиметрические коэффициенты для этих двух ситуаций не различаются между курящими и некурящими. Такой подход является обоснованным для целей радиологической защиты.

(36) Рассчитанное значение дозового коэффициента для жилищ составляет 13 мЗв на РУМ (Marsh and Bailey, 2013). С учетом этого дозового коэффициента и параметров облучения ($F=0,4$, время нахождения в помещении $7000 \text{ ч}\cdot\text{год}^{-1}$) среднегодовая объемная активность радона $300 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ соответствует дозе в пределах интервала референтного уровня в ситуации существующего облучения от 1 до 20 мЗв, хотя и близкой верхней границе этого интервала. Для сравнения: при использовании условного дозового перехода на основе эпидемиологических данных (см.: параграф 27 выше) и пересмотренного в *Публикации 115* коэффициента номинального риска (Marsh et al., 2010) та же объемная активность радона $300 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ соответствует годовой дозе примерно 10 мЗв. Дозовый коэффициент, равный 11 мЗв на РУМ, для облучения в шахтах был получен с использованием дозиметрического подхода и составляет практически ту же величину, что и была получена при помощи условного дозового перехода.

2.4. Проблемы контроля облучения радоном

(37) Контроль облучения радоном в помещениях создает ряд проблем, которые должны быть решены в рамках национальной стратегии защиты от радона, в частности, это вопросы, касающиеся общественного здравоохранения и юридической ответственности.

2.4.1. Общественное здравоохранение

(38) Люди подвергаются облучению радоном как представители населения в жилищах или как работники на рабочих местах. Они также подвергаются облучению радоном в общественных или открытых для доступа частных местах в качестве представителей населения либо работников. Поскольку человек перемещается между многими местами в течение обычного дня, то стратегия защиты от радона в идеале должна обеспечить согласованность в управлении различными помещениями на данной территории, а также обеспечить единый подход, несмотря на то, что время пребывания в разных местах различно.

(39) Согласно ВОЗ облучение радоном в жилищах представляет существенную опасность для здоровья населения (ВОЗ, 2009) с учетом оцененной смертности от рака легкого, обусловленной радоном, по сравнению с другими раками. Люди проводят большую часть своего времени в помещениях, в основном дома. Поскольку с точки зрения общественного здравоохранения облучение радоном в домашних условиях представляет наибольшее значение, стратегия защиты от радона должна быть нацелена в первую очередь на жилища, а не общественные здания и рабочие места,

где помещения находятся под формальным управлением и меры регулирования более соответствуют ситуации.

(40) Несмотря на то, что эпидемиологические исследования облучения радоном детей в домашних условиях не проводились, предполагается, что они более чувствительны к облучению, чем взрослые. Тем не менее в соответствии с единым подходом и учитывая, что риск накапливается в течение всей жизни, Комиссия не предлагает специальные индикаторы и рекомендации для детей. Однако наличие значительного числа детей в здании является аргументом для повышенного внимания и приоритетного осуществления мер по профилактике и снижению облучения.

(41) С точки зрения общественного здравоохранения снижение облучения радоном является долгосрочной задачей. В новых зданиях наиболее актуальная задача – предотвратить облучение, поэтому превентивные меры в новых и реконструируемых зданиях являются хорошим решением. Их экономическая эффективность возрастает с накоплением опыта и с применением строительных норм (STUK, 2008). Кроме того, это способствует пониманию проблемы специалистами строительной отрасли.

(42) Меры по снижению облучения также часто целесообразны в существующих зданиях с высокой объемной активностью радона. В таких случаях может существовать единственный основной источник поступления радона, и его уровни часто могут быть снижены более чем в десять раз.

(43) Распределение индивидуальных уровней облучения радоном имеет большой разброс, а доказательства риска рака легкого существуют при усредненной по длительному периоду объемной активности радона менее 200 Бк·м⁻³ (ICRP, 2011). Вследствие этого целью должно быть снижение как общего риска для всего населения, так и индивидуального риска наиболее облучаемых лиц до разумно достижимого уровня. В то же время полное устранение облучения радоном невозможно.

(44) Облучение радоном – не единственный источник риска для населения. Стратегия защиты от радона должна разумно сочетаться с другими опасностями для здоровья и приоритетными задачами здравоохранения, установленными в стране. Более того, чтобы избежать противоречий и достичь лучшей эффективности, следует добиваться соотношения и интеграции стратегии защиты от радона с решением других проблем для общественного здравоохранения, таких как курение и качество воздуха в помещениях.

(45) Учитывая повсеместность облучения радоном, множественность и разнообразие ситуаций и лиц, принимающих решения, наиболее пригодной является прямая, реалистичная и единая стратегия защиты

от радона, позволяющая рассматривать большинство ситуаций на основе одного и того же подхода. Она должна поддерживаться и осуществляться на долгосрочной, потенциально на постоянной основе и вовлекать все заинтересованные стороны.

2.4.2. Ответственность заинтересованных сторон

(46) Многие проблемы в рамках национальной стратегии защиты от радона решаются с точки зрения юридической ответственности, в первую очередь это относится к ответственности домовладельца по отношению к жителям, застройщика или продавца недвижимости к покупателю, хозяина к арендатору, работодателя к работнику и вообще ответственного лица за любое здание по отношению к пользователям.

(47) Поскольку облучение радоном это в основном проблема жилища, то успех стратегии защиты от радона во многом зависит от решений, принимаемых отдельными лицами для снижения риска в их доме, когда это необходимо (самостоятельная защита). Чтобы помочь людям осознать свою ответственность, необходимо ясное понимание рисков, связанных с радоном, всем населением, в частности, в радоноопасных районах. Следует признать, что в настоящее время в большинстве стран, за исключением тех, в которых проводится политика в отношении радона, это понимание является недостаточным, оно должно быть усилено. Улучшение ситуации может быть достигнуто посредством разработки плана действий, в котором описывается риск, связанный с радоном, и меры, необходимые для снижения риска. Обязательной предпосылкой является обеспечение заинтересованных лиц соответствующей инфраструктурой, информацией и поддержкой при проведении измерений и мероприятий по снижению облучения.

(48) Уровень обязательности действий тесно связан со степенью юридической ответственности за ситуацию. Такая ответственность возлагается на собственника, когда дом сдается в аренду или продается. Работодатель несет юридическую ответственность за здоровье и безопасность своих сотрудников. Управляющий школой (или местные органы власти) могут нести юридическую ответственность за здоровье как учащихся, так и работников. Это же соображение может быть распространено и на другие общественные здания и рабочие места. Требования, связанные с обязанностями, должны соответствовать политике в области здравоохранения в стране.

(49) Вопрос ответственности ясно указывает на необходимость последовательного подхода в определении и осуществлении стратегии защиты от радона. Такой последовательный подход должен быть в равной степени амбициозным и реалистичным.

3. СИСТЕМА МКРЗ РАДИОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ОБЛУЧЕНИЯ РАДОНОМ

(50) Система радиологической защиты, разработанная Комиссией, описана в *Публикации 103*³ (ICRP, 2007). В соответствии с п. 44 она «относится ко всем видам радиационных облучений от любого источника независимо от его размера и происхождения». В частности, согласно п. 45, «Рекомендации Комиссии распространяются на облучение как от природных, так и от искусственных источников излучения. В целом Рекомендации могут быть использованы только в ситуациях, при которых или источник излучения или пути облучения, создающие дозу у индивидуумов, могут быть проконтролированы разумными средствами. Источники излучения в таких ситуациях называются контролируруемыми источниками».

(51) Облучение радоном в помещениях является контролируемым, так как путями от источника к облученным лицам в основном можно управлять или оказывать на них воздействие. Объемная активность радона на открытом воздухе на уровне земли может быть высокой, но газообразный радон обычно разбавляется путем рассеивания в атмосфере, так что объемная активность в атмосферном воздухе обычно довольно низкая, до десятков Бк·м⁻³ (UNSCEAR, 2009), за исключением небольшого числа территорий с очень высокой эксхалацией радона. Поскольку на открытом воздухе ни источником, ни путями облучения нельзя управлять, то Комиссия считает, что облучение человека радоном вне зданий не поддается контролю, кроме случая, когда очень высокая объемная активность создается источником, измененным в результате деятельности человека.

³ Во время выпуска настоящей Публикации Комиссия пересматривала глоссарий, представленный в *Публикации 103*, из-за некоторых недостатков и несоответствий с текстом, поэтому данное издание ссылается на текст *Публикации 103*, а не на ее глоссарий.

3.1. Ситуации облучения и категории облучения

3.1.1. Типы ситуаций облучения

(52) Ситуация облучения – это процесс, который включает природный или искусственный источник излучения и перенос радиации различными путями, приводящий к облучению человека. Согласно рекомендациям *Публикации 103* (ICRP, 2007) радиологическая защита организуется в соответствии с тремя типами ситуации облучения: планируемого облучения, аварийного облучения и существующего облучения. Ситуации планируемого облучения – это ситуации, которые создаются в результате преднамеренного введения в эксплуатацию источников и их эксплуатации. Такое облучение можно предвидеть и полностью контролировать. Ситуации аварийного облучения – ситуации, связанные с потерей контроля над источником, требующие срочного действия, чтобы избежать или уменьшить нежелательные последствия. К таким ситуациям относится также облучение, возникающее вследствие злонамеренных действий либо как результат любой другой неожиданной ситуации. Ситуации существующего облучения – это ситуации, в которых источник уже существует, когда принимается решение о контроле связанного с ним облучения. Эти ситуации включают облучение от природных источников излучения, а также прошлых событий, аварий и деятельности. Анализ характеристик облучения в этих ситуациях является необходимым условием для его контроля.

(53) Ситуации облучения радоном имеют характеристики ситуации существующего облучения, поскольку источником являются неизменные концентрации естественных радионуклидов, повсюду присутствующие в земной коре. Деятельность человека может создать или изменить пути поступления радона, повышая его объемную активность внутри помещений по сравнению с фоновыми значениями на открытой местности. Эти пути могут быть изменены превентивными и снижающими облучение действиями, сам источник, однако, уже существует и не может быть модифицирован, когда принимается решение о контроле. Облучение радоном в жилищах или на рабочих местах приводится в качестве примера ситуации существующего облучения в *Публикации 103* (ICRP, 2007, п. 284).

(54) Облучение радоном при добыче урана часто регулируется так же, как и ситуация планируемого облучения, потому что добыча урана является частью ядерного топливного цикла, а работники подвергаются профессиональному облучению и от других источников излучения помимо радона: внешнее воздействие гамма-излучения, вдыхание или заглатывание пыли. Национальные власти должны решить, какие другие ситуации облучения радоном следует с самого начала рассматривать как ситуации планируемого облучения.

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

(55) Маловероятно, что радон может привести к ситуации аварийного облучения. Однако при обнаружении очень высокой объемной активности может потребоваться скорейшее осуществление защитных мер, в частности, если облучение воздействует на обитателей, о которых принимающий решение собственник обязан заботиться.

(56) Принципиальное отличие *Публикации 103* (МКРЗ, 2007) по сравнению с *Публикацией 60* (МКРЗ, 1991) состоит в рекомендации согласованного подхода к управлению всеми видами ситуаций облучения. Этот подход основан на применении оптимизации ниже соответствующих ограничений доз (т. е. пределов дозы или референтных уровней).

3.1.2. Категории облучения

(57) Комиссия различает три категории облучения: медицинское облучение, профессиональное облучение и облучение населения.

(58) Профессиональное облучение – это радиационное воздействие на работников, которому они подвергаются в процессе работы. Однако из-за повсеместного присутствия радиоактивности прямое применение этого определения к ионизирующему излучению означало бы, что все работники должны подлежать режиму радиологической защиты. Поэтому Комиссия ограничивает применение термина «профессиональное облучение» теми воздействиями ионизирующего излучения на работника, которым он подвергается во время его работы в результате ситуаций, которые могут быть обоснованно отнесены к ответственности оперативного управления (ICRP, 2007, п. 178). На большинстве рабочих мест облучение радоном является случайным, т. е. оно не обусловлено и не связано с природой производимых работ, а возникает потому, что работники и другие лица находятся в помещениях работодателя.

(59) *Публикация 65* (ICRP, 1993, п. 86) определяет, что «работники, которые не рассматриваются как профессионально облучаемые, как правило, рассматриваются так же, как и лица из населения». Эта рекомендация остается в силе с учетом того, что здоровье и безопасность работников продолжают оставаться под ответственностью их работодателей. Иными словами, на обычных рабочих местах, где облучение радоном является случайным, радон регулируется не путем контроля индивидуальных облучений, а путем контроля здания или помещений для обеспечения общей защиты их обитателей, как в случае жилищ.

(60) В тех случаях, когда облучение радоном сопутствует облучению в ситуации планируемого облучения (например, облучение радоном на ядерном объекте или в радиологическом отделении медицинского учреждения), Комиссия рекомендует прагматический подход.

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

Облучение радоном работников может быть частью общего профессионального облучения, только если это необходимо в рамках особого последовательного подхода к рабочим местам, который описан в разделе 3.3.5.

(61) Подход Комиссии к регулированию облучения радоном также непосредственно связан с типом помещения. В *Публикации 65* (ICRP, 1993) делается различие между подходом к защите в жилищах и на рабочих местах. Принимая во внимание, что конкретный человек, как правило, перемещается с места на место в жилищах, на рабочих местах и в многофункциональных зданиях одной территории, Комиссия рекомендует единый и последовательный подход к защите во всех зданиях на основе требований, установленных для защиты населения. Кроме того, Комиссия считает целесообразным применять требования для профессионального облучения на отдельных рабочих местах, которые определяются на основе референтного уровня как количественного критерия или перечня видов деятельности или объектов как качественного критерия (см. раздел 3.3.5).

(62) С учетом этого нового подхода Комиссия больше не использует термин «начальная точка», введенный в *Публикации 103* (ICRP, 2007, п. 298), для обозначения уровня объемной активности радона, выше которого следовало применять требования к профессиональному облучению при облучении радоном на рабочих местах.

3.2. Обоснование стратегий защиты

(63) В системе защиты МКРЗ обоснование является одним из двух фундаментальных принципов, связанных с источником (ICRP, 2007, п. 203). При его применении любое решение, которое меняет ситуацию радиационного облучения, должно приносить больше пользы, чем вреда. Это означает, что, вводя новый источник излучения, уменьшая существующее облучение или снижая риск потенциального облучения, следует добиваться достаточных индивидуальных или социальных выгод, чтобы компенсировать ущерб, вызванный этими действиями.

(64) Облучение радоном может контролироваться в основном путем действий, модифицирующих пути облучения и, как правило, не воздействующих непосредственно на источник. В этих условиях принцип обоснования применяется при принятии решения относительно того, реализовывать или нет стратегию защиты от облучения радоном. Такое решение, которое всегда будет иметь некоторые недостатки, должно

быть оправдано в том смысле, что оно должно приносить больше пользы, чем вреда (ICRP, 2007; п. 207). Ответственность за обоснованность стратегии защиты от радона в целях обеспечения общей пользы ложится на правительство или национальные органы власти. Анализ ситуации, включая оценку объемной активности радона и определение радоноопасных территорий, а также определение приоритетов общественного здравоохранения и социальных и экономических факторов, является необходимым при рассмотрении национальными властями обоснованности стратегии защиты от радона в стране.

(65) Комиссия считает, что существует значительное число аргументов, которые служат для обоснования национальных стратегий защиты от радона. Эти аргументы включают следующие:

- радон является значимым источником радиационного облучения и второй после курения причиной рака легкого среди всего населения;
- облучение радоном может быть контролируемым. Существуют несложные методы предотвращения и снижения высоких объемных активностей радона внутри помещений;
- стратегия защиты от радона может иметь положительные последствия для решения других проблем общественного здравоохранения, таких как качество воздуха в помещениях и борьба с курением. Снижение объемной активности радона способствует снижению воздействия табака на здоровье.

(66) Хотя радон имеет гораздо больше шансов вызвать рак легкого у курящих или у тех, кто курил в прошлом, чем у никогда не куривших, имеющиеся данные свидетельствуют, что он является основной причиной рака легкого у людей, которые никогда не курили (ВНО, 2009). Дополнительные относительные риски для курящих и некурящих сопоставимы. На практике трудно решать вопросы защиты от радона по отдельности или по-разному для курящих, некурящих, пассивных курильщиков или курильщиков в прошлом. Например, курение может быть ограничено внутри здания, однако на практике невозможно разрешать доступ в здание на основании того курит человек или нет. Введение различных требований для курящих и некурящих на рабочих местах может вызвать этические и социальные проблемы, которые не входят в компетенцию Комиссии. Рекомендации Комиссии по регулированию обучения радоном не различаются для курящих и некурящих.

3.3. Оптимизация защиты

(67) Оптимизация защиты является вторым основополагающим принципом радиологической защиты и занимает центральное место в системе защиты. Этот принцип, как и принцип обоснования, связан с источником и относится к трем ситуациям облучения: планируемого, аварийного и существующего. Согласно принципу оптимизации вероятность подвергнуться облучению, количество облучаемых людей и их индивидуальные дозы должны поддерживаться на столь низком уровне, какой только разумно достигим с учетом экономических и социальных факторов. Это означает, что уровень защиты должен быть наилучшим в сложившихся условиях и обеспечивать максимальное превышение пользы над вредом. Чтобы избежать тяжелых необоснованных последствий оптимизации, должны вводиться ограничения на дозы или риски для индивидов от определенного источника (граничные дозы или риски и референтные уровни) (см. ICRP, 2007, пп. 203 и 211).

(68) Реализация принципа оптимизации защиты – это процесс, который закладывается в основу успешной программы радиологической защиты. Она должна быть тщательно оформлена, чтобы учесть существенные особенности ситуации облучения. Кроме того, она должна включать, когда это важно для ситуации облучения, участие всех заинтересованных сторон. Эти два элемента рассматриваются Комиссией в качестве важных компонентов процесса оптимизации (ICRP, 2006b, п. 23).

3.3.1. Референтный уровень

(69) В *Публикации 65* (ICRP, 1993) Комиссия считала, что некоторые корректирующие меры против радона в жилых домах почти всегда оправданы при постоянном превышении годовой эффективной дозы 10 мЗв. Комиссия также считала, что было бы логично принять уровень действий для вмешательства на рабочих местах на том же уровне эффективной дозы, что и для уровня действий для жилых помещений. С учетом того, что для простых корректирующих мер могут быть рассмотрены несколько меньшие значения, Комиссия рекомендовала использовать диапазон примерно 3–10 мЗв в качестве основы для принятия уровней действий для вмешательства в жилищах или на рабочих местах. Уровень действий был определен как среднегодовая объемная активность радона, при которой рекомендуется вмешательство для снижения облучения в жилище или на рабочем месте.

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

(70) В *Публикации 103* (ICRP, 2007) Комиссия отказалась от использования понятия «уровень действия» и ввела вместо этого понятие «референтный уровень» в сочетании с принципом оптимизации. В ситуациях аварийного и существующего контролируемого облучения референтный уровень – это уровень, ниже которого дозы облучения должны быть снижены до разумно достижимой величины, принимая во внимание экономические и социальные факторы. Допускать облучение выше референтного уровня необоснованно.

(71) Следствием использования понятия «референтный уровень» вместо «уровень действия» стало то, что оптимизация оправдана при облучении выше и ниже референтного уровня, а не только когда он превышает. Следует иметь в виду, что референтные уровни не являются границей между «безопасным» и «опасным» и не отражают качественные изменения в соответствующем риске для здоровья индивидов.

(72) Согласно *Публикации 103* (ICRP, 2007) выбор значения для референтного уровня зависит от сложившихся обстоятельств рассматриваемой ситуации облучения (ICRP, 2007; п. 234). Чтобы дать руководство для выбора соответствующих значений, Комиссия определила шкалу доз (ICRP, 2007; табл. 5), которая отражает тот факт, что в рамках континуума риска (предположение о линейной беспороговой зависимости) риск, который человек готов принять, зависит от условий облучения. Эта шкала разделена на три диапазона, которые отражают различную степень необходимости действий, зависящую от характеристик ситуации облучения: управляемость источника, индивидуальные или социальные выгоды от ситуации; требования, касающиеся информации, обучения, дозиметрического или медицинского наблюдения. Эти три диапазона определяются следующими численными значениями доз острого облучения или годовых доз: <1 мЗв, 1–20 мЗв и 20–100 мЗв.

(73) Согласно *Публикации 103* (ICRP, 2007) референтные уровни для ситуаций существующего облучения должны, как правило, устанавливаться в диапазоне от 1 до 20 мЗв. Они применяются, когда люди получают прямую выгоду от деятельности, связанной с облучением, и когда можно осуществлять контроль источника или воздействовать на пути облучения. Необходимая информация по снижению доз облучения должна быть по возможности доступна для людей. Источник облучения радоном обычно невозможно контролировать (за несколькими исключениями), но можно влиять на пути облучения при помощи таких предупредительных и корректирующих действий, ущерб от которых не будет непропорционально большим. Очевидно, что человек обычно получает прямую выгоду от пребывания

ния в помещении, поэтому продолжать находиться или проживать в здании выгоднее, чем переезжать в другое здание или даже в другой район.

(74) В *Публикации 103* (ICRP, 2007) Комиссия сохранила для индивидуального референтного уровня верхнее значение эффективной дозы 10 мЗв, принятое в *Публикации 65* (ICRP, 1993). Это значение соответствует середине диапазона 1–20 мЗв и согласуется с обоснованием, представленным в *Публикации 103* (ICRP, 2007, табл. 5). В целях преемственности и практичности Комиссия по-прежнему рекомендует референтный уровень порядка 10 мЗв в год. Комиссия также рекомендует использовать производный референтный уровень, выраженный в единицах объемной активности радона в помещении (в Бк·м⁻³), которая является измеряемой величиной.

3.3.2. Производный референтный уровень для радона

(75) В Заявлении по радону (ICRP, 2010) Комиссия снизила производный референтный уровень для газообразного радона в жилищах с величины 600 Бк·м⁻³, опубликованной в Рекомендациях 2007 г. (ICRP, 2007) до 300 Бк·м⁻³, основываясь на эпидемиологических данных. Комиссия продолжает рекомендовать величину 300 Бк·м⁻³ в качестве верхней границы производного референтного уровня для газообразного радона в жилищах. Хотя и нет единственного значения годовой дозы, которое можно ассоциировать с 300 Бк·м⁻³, ясно, что подавляющее большинство оценок годовых доз, обусловленных такой объемной активностью, находятся в диапазоне, который уже был определен Комиссией в качестве уровня, используемого для соответствующих ситуаций существующего облучения (1–20 мЗв·год⁻¹).

(76) В Руководстве по радону ВОЗ заявила, что национальный референтный уровень 100 Бк·м⁻³ оправдан с позиций общественного здравоохранения, в то же время ВОЗ осознает, что этот уровень не может быть принят во многих странах (WHO, 2009). Величина 300 Бк·м⁻³ уже включена в нормативные документы, такие как Международные базовые стандарты МАГАТЭ (IAEA, FAO, ILO OECD/NEA, PAHO, UNEP, WHO, 2011) или Европейские базовые стандарты Евроатома (EURATOM, 2014), которые были недавно пересмотрены. Как предусмотрено в *Публикации 103* (ICRP, 2007, п. 295), в ответственность соответствующих национальных органов входит, как и в отношении других контролируемых источников, установление своих собственных национальных производных референтных уровней с учетом имеющихся экономических и социальных условий. Затем проводится оптимизация защиты. Комиссия настоятельно призывает национальные власти установить национальный произ-

водный референтный уровень на разумно достижимом низком уровне в диапазоне от 100 до 300 Бк·м⁻³. Важно отметить, что производный референтный уровень относится к среднегодовой объемной активности радона в зданиях и других местах. Более того, хотя абсолютный риск рака легкого, связанный с облучением радоном, существенно больше для курильщиков по сравнению с некурящими, Комиссия не рекомендует делать различия между этими категориями в вопросе защиты от радона.

(77) С учетом того, что люди передвигаются с места на место в пределах одной территории, стратегия защиты от радона должна разрабатываться и осуществляться национальными властями на последовательной и единой основе в различных местах. Вследствие этого Комиссия рекомендует априори одинаковый референтный уровень в жилищах и в многофункциональных зданиях (школы, больницы, магазины, кинотеатры и т. п.), в которые имеют доступ представители населения и работники, а также на рабочих местах без доступа посторонних, если облучение радоном не является профессиональным (офисные здания или типичные производственные помещения).

3.3.3. Процесс оптимизации

(78) В соответствии с п. 22 части 2 *Публикации 101* (ICRP, 2006b) «для обеспечения лучшей защиты в сложившихся условиях (в нормальных, аварийных или существующих управляемых ситуациях) должен осуществляться процесс оптимизации ниже граничной дозы как поступательный повторяющийся процесс (называемый процессом оптимизации), который включает оценку ситуации облучения для определения необходимых действий (организация процесса); выявление возможных вариантов защиты для удержания облучения на минимальном разумно достижимом уровне; выбор наилучшего варианта в сложившихся условиях; реализацию выбранного варианта посредством эффективной оптимизационной программы и регулярную оценку ситуации облучения для определения того, что в сложившихся условиях требуется применение корректирующих мер защиты».

(79) Применительно к оптимизации Комиссия считает, что следует различать предотвращение, нацеленное на поддержание облучения на разумно достижимом в сложившихся условиях низком уровне, и смягчение последствий, нацеленное на снижение остаточной дозы настолько, насколько это разумно достижимо (см. рис. 3.1). В случае облучения радоном центральное место в предотвращении занимают строительные нормы, при этом целью является не допустить высокой объемной активности радона в новых зданиях. В то же время снижение облучения

основывается на уменьшении высокой объемной активности радона в существующих зданиях посредством применения таких методов, как регулируемая вентиляция.

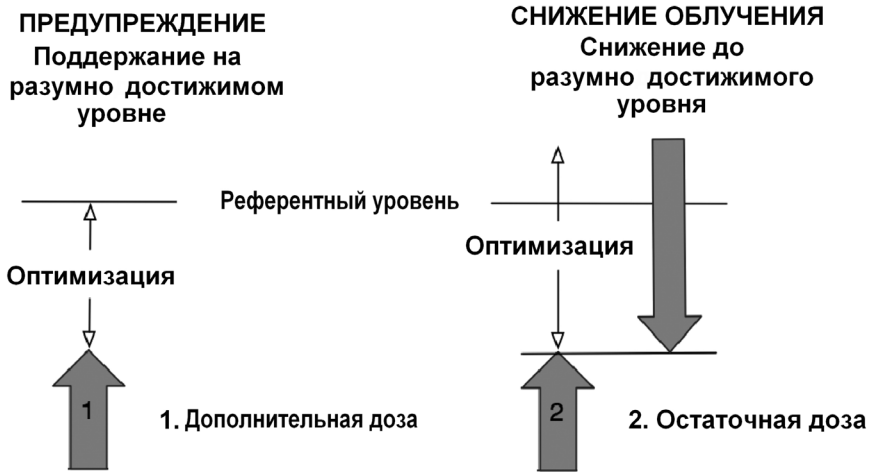


Рис. 3.1. Применение принципа оптимизации

(80) Цель процесса оптимизации состоит как в снижении общего риска для всего населения, так и индивидуального риска наиболее облучаемых лиц, т. е. тех, кто находится на верхней части распределения индивидуальных доз облучения (см. рис. 3.2). В обоих случаях процесс включает управление зданиями или другими местами, которое в результате должно привести к разумно достижимым низким уровням объемной активности радона в воздухе помещений ниже национального референтного уровня. После того как в здании успешно пройдут мероприятия по управлению, единственным оставшимся требованием будет проведение рутинных инспекций системы снижения облучения, поддержание ее работоспособности, а также периодический мониторинг для подтверждения того, что уровень радона остается низким.

(81) Цель значительного снижения риска от радона для всего населения скорее является вопросом нескольких десятилетий, чем нескольких лет.

(82) Оптимизация защиты от облучения радоном в зданиях и других местах может быть определена с использованием стандартного способа оптимизации, включающего анализ затрат и выгоды, а также многофакторный анализ. Необходимо беспристрастно рассмотреть все существенные факторы, включая технические, экономические, социальные и этические, особенно для случаев очень высоких уровней облучения. Так, можно

сравнить финансовые затраты, связанные с расчетным числом случаев рака легкого, которые предположительно обусловлены радоном при различных уровнях облучения, с выбором предупредительных и защитных мероприятий для заданного населения, а также с затратами на меры по снижению облучения радоном (НРА, 2009; WHO, 2009). Такой анализ может быть использован для информирования лиц, принимающих решения относительно экономической эффективности мер по снижению уровня объемной активности радона в существующих и новых домах.

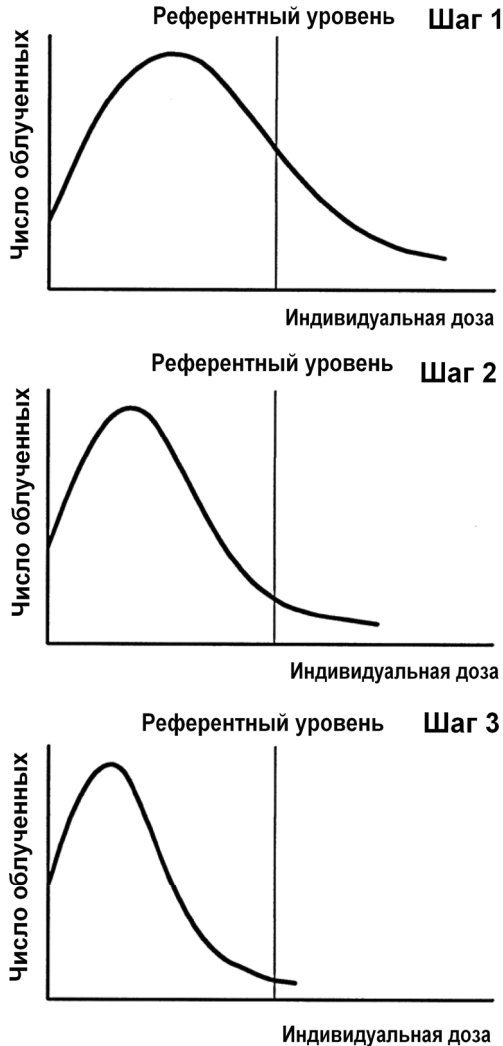


Рис. 3.2. Применение референтного уровня в ситуации существующего облучения и изменение распределения индивидуальных уровней облучения с течением времени в результате процесса оптимизации.

3.3.4. Национальный производный референтный уровень

(83) Как подчеркивалось ранее, соответствующие национальные органы власти обязаны, как и для всех других контролируемых источников излучения, установить свои национальные производные референтные уровни в терминах объемной активности радона ($\text{Бк}\cdot\text{м}^{-3}$) с учетом сложившихся экономических и социальных условий, а затем применить процесс оптимизации защиты в своей стране. Как указывается в подразделе 3.3.2, Комиссия настоятельно призывает национальные власти установить национальный производный референтный уровень на разумно достижимом низком уровне в диапазоне от 100 до 300 $\text{Бк}\cdot\text{м}^{-3}$.

(84) Первый шаг состоит в анализе ситуации облучения отдельных лиц и населения в целом в стране, а также соответствующих экономических и социальных условий и целесообразности снижения или предотвращения облучения. Затем в процессе общей оптимизации может быть установлено значение производного референтного уровня с учетом национальных или региональных особенностей и предпочтений, а также, где это уместно, международных рекомендаций и примеров успешной практики. Должны быть приняты во внимание многие факторы, такие как средняя объемная активность радона и распределение радона, количество существующих домов с высокими уровнями радона и т. д.

(85) После определения национального производного референтного уровня должны быть предприняты меры по предупреждению и снижению облучения радоном, чтобы достичь требуемого существенного понижения облучения. Незначительные улучшения, нацеленные только на снижение объемной активности радона до значений немного ниже национального производного референтного уровня, не являются достаточными. Национальный производный референтный уровень следует применять также на стадии проектирования новых зданий любого назначения.

(86) Значение национального производного референтного уровня для облучения радоном должно периодически пересматриваться, чтобы убедиться, что оно остается приемлемым.

3.3.5. Последовательный подход

(87) В настоящее время Комиссия рекомендует применять последовательный подход к контролю облучения радоном. В соответствии с таким подходом стратегия защиты от радона должна начинаться с программы, нацеленной на то, чтобы побудить соответствующих лиц, принимающих решения, содействовать самостоятельным защитным мерам, таким как проведение измерений и при необходимости снижение облучения. Этот процесс может быть реализован с помощью информирования, консульта-

ций, стимулирования, оказания практической помощи и при необходимости предъявления формальных требований. Степень обязательности этих мероприятий зависит от характера юридической ответственности за ситуацию и целей национальной стратегии защиты радона.

(88) Стратегия защиты от радона должна включать программу действий, предполагающую предоставление общей информации о свойствах радона и риске, кампанию по осведомлению общественности, проведение измерений объемной активности, а также организацию технической и финансовой поддержки для выполнения измерений и мероприятий по снижению уровней облучения (см. раздел 4). Эти действия могут быть реализованы преимущественно в определенных областях, например, на радоноопасных территориях и в интенсивно используемых зданиях. К таким зданиям могут относиться дома, в которых проживает большое количество людей, или в которых люди проводят значительное время.

(89) В ситуациях, когда имеется юридическая ответственность (например, работодатель/работник, арендодатель/арендатор, продавец/покупатель, общественные здания с высокой посещаемостью), могут оказаться необходимыми некоторые обязательные требования. Применение обязательных требований вместо мер стимулирования оправдано, если анализ показывает, что в существующей ситуации эффективность обязательных требований, соразмерных степени и виду ответственности, будет выше. Такие требования могли бы обеспечить хорошее документирование, учет и соблюдение производного референтного уровня.

(90) Стратегия защиты от радона должна обеспечить соответствие требований ресурсам, имеющимся в распоряжении ответственных лиц или организаций, и превышение пользы над ущербом с точки зрения снижения риска. Например, требования не должны удерживать людей от проведения начальных измерений радона, приводить к снижению стоимости недвижимости и включать избыточные положения. Если в здании обнаружена высокая объемная активность радона, последующие действия должны включать привлечение и взаимодействие с заинтересованными лицами, такими как пользователи здания. В случае несоответствия референтному уровню последствия также должны быть адаптированы к ситуации. Например, ответственным за жилища следует предоставить информацию о результатах измерений органам власти или покупателю и принять обязательство по исправлению ситуации.

(91) На большинстве рабочих мест облучение работников радоном является случайным и в большей степени связано с местом нахождения, чем с выполняемой работой. По определению Комиссии такое облучение не рассматривается как профессиональное. Эти соображения не затраги-

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

вают юридической ответственности работодателя перед своими работниками. Рабочие места этой категории включают многофункциональные здания, такие как школы, больницы, почтовые отделения, тюрьмы, магазины, кинотеатры, а также офисные здания и типичные производственные помещения.

(92) На всех рабочих местах, где облучение радоном считается случайным и не профессиональным, первый шаг последовательного подхода состоит в управлении рабочим местом с использованием национального производного референтного уровня ($300 \text{ Бк}\cdot\text{м}^3$ или меньше) и оптимизации. Юридические обязательства работодателя по отношению к работнику выполняются на основе применения нормативных требований, стандартов, принятых на основе консенсуса, или других стандартов, которые могут быть установлены для контроля облучения радоном в зданиях в рамках реализации национальной радоновой стратегии.

(93) Соотношение между измеренной объемной активностью радона и эффективной дозой зависит от различных параметров, включая коэффициент равновесия, время облучения и другие параметры, которые могут существенно меняться в зависимости от места. Поэтому, если производный референтный уровень на рабочем месте превышен, то это не означает, что дозовый референтный уровень, представляющий годовую дозу примерно 10 мЗв в год, также превышен.

(94) Соответственно, если возникают трудности в поддержании объемной активности радона на рабочих местах ниже референтного уровня, то стратегия защиты от радона в качестве второго шага последовательного подхода должна обеспечивать возможность проведения дополнительного предметного анализа. Он подразумевает проведение оценки облучения радоном с учетом фактических параметров ситуации облучения (например, фактического времени нахождения или измерений дочерних продуктов радона). Для принятия решения о необходимости и типе последующих действий дозы, рассчитанные таким образом, следует сравнить с дозовым референтным уровнем 10 мЗв в год. На этой стадии целью по-прежнему является обеспечение общей защиты пользователей здания, а не контроль доз облучения отдельных лиц.

(95) На рабочих местах, на которых, несмотря на все разумные усилия по снижению облучения радоном, индивидуальные дозы облучения остаются выше 10 мЗв в год, работники должны рассматриваться как подвергающиеся профессиональному облучению, и их облучение должно регулироваться с применением соответствующих требований радиологической защиты, предъявляемых к профессиональному облучению: идентификации облучаемых работников, информирования, обучения, мони-

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

торинга доз облучения (по величине дозы или удельной потенциальной энергии альфа-излучения), ведения регистра и наблюдений за состоянием здоровья. В любом случае индивидуальные дозы не должны превышать верхнюю границу диапазона 1–20 мЗв, рекомендованного для определения референтного уровня в ситуациях существующего облучения. Это третий шаг последовательного подхода.

(96) В случаях, когда облучение радоном работников некоторых определенных типов рабочих мест является неизбежным и значительным и это облучение непосредственно или явно связано с выполняемой работой, национальные власти могут решить, что облучение радоном этих работников следует рассматривать как профессиональное, независимо от того, выше оно или ниже референтного уровня. Перечень рабочих мест или видов трудовой деятельности (шахты и другие подземные рабочие места, термальные курорты и т. п.) должен быть установлен на национальном уровне.

(97) На рабочих местах, где работники считаются подвергающимися профессиональному облучению, Комиссия рекомендует определение соответствующих рабочих зон. Это могут быть части зданий, отдельные здания или части площадки. В пределах этих рабочих зон работодатель должен обеспечить соответствие требованиям для профессионального облучения и применить принцип оптимизации. Если национальные органы власти решат, что ситуация облучения радоном является ситуацией планируемого облучения, то ограничение облучения можно обеспечить, применяя предел дозы профессионального облучения (см.: раздел 3.4).

(98) По мнению Комиссии, решение является ли облучение радоном работников профессиональным, должно приниматься национальными властями.

3.4. Применение пределов дозы

(99) Согласно *Публикации 103* (ICRP, 2007; п. 203) принцип применения пределов дозы является третьим основополагающим принципом системы МКРЗ. Он применяется на индивидуальном уровне и только в ситуациях планируемого облучения. Это означает, что суммарная доза для любого лица от регулируемых источников в ситуациях планируемого облучения, кроме медицинского облучения пациентов, не должна превышать соответствующие пределы, рекомендованные Комиссией. Дозовый предел следует также применять в ситуациях облучения радоном, которые национальные власти определили с момента их возникновения как ситуа-

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

ции планируемого облучения, когда работники считаются подвергающимися профессиональному облучению. Предел дозы, рекомендованный Комиссией для профессионального облучения, выражен эффективной дозой 20 мЗв в год, усредненной за определенный 5-летний период (100 мЗв в 5 лет), с дополнительным условием, что эффективная доза не должна превышать 50 мЗв в любой отдельный год (см. ICRP, 2007; п. 244).

3.5. Резюме

(100) На рис. 3.3 показан рекомендуемый в настоящее время общий подход для обращения с различными ситуациями облучения радоном.

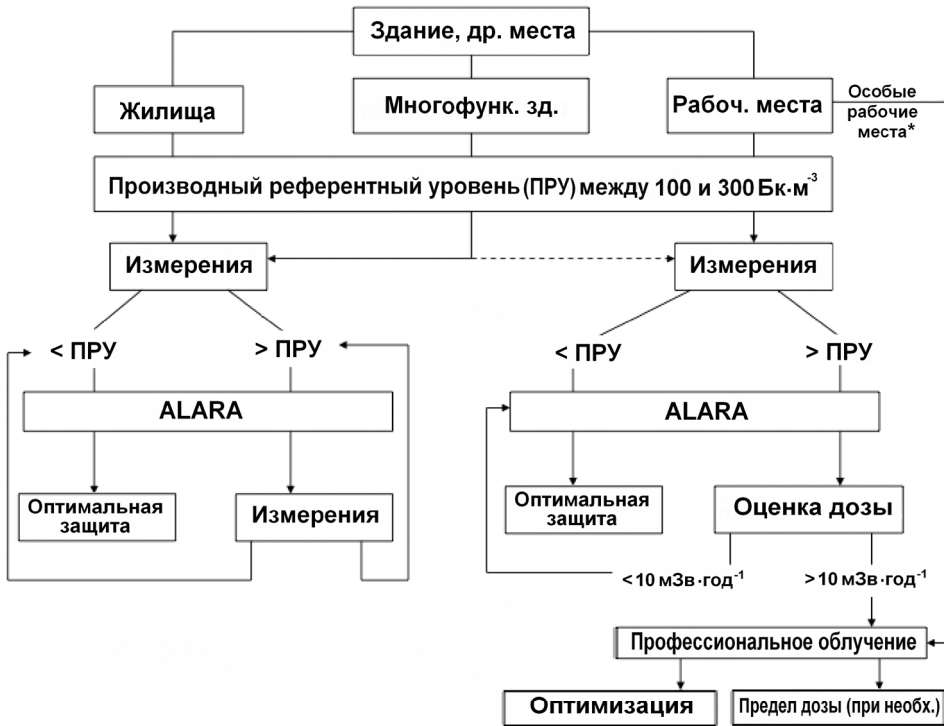


Рис. 3.3. Общий подход к регулированию облучения радоном. ALARA – снижение облучения до разумно достижимого уровня с учетом экономических и социальных факторов

** Рабочие места, на которых облучение радоном рассматривается национальными властями как профессиональное с момента их возникновения.*

4. РЕАЛИЗАЦИЯ СТРАТЕГИЙ ЗАЩИТЫ

4.1. Национальный план действий

(101) Национальный план действий по радону должен быть установлен национальными органами власти с привлечением заинтересованных лиц. Цель национального плана – снизить коллективный и индивидуальный риск, связанный с облучением радоном, на основе реализации принципа оптимизации.

(102) План действий должен создать основу с четкой инфраструктурой, определить приоритеты и обязанности и описать последовательные шаги по борьбе с радоном в стране. В зависимости от условий облучения необходимо определить заинтересованные стороны, в первую очередь те, которые подвергаются облучению, и те, кто обязан обеспечить поддержку и предпринять необходимые меры. Кроме этого, в плане действий должны решаться этические проблемы, в частности, связанные с ответственностью за предоставление информации, методических рекомендаций и помощи, а также рассматриваться условия для устойчивого развития. Для достижения синергизма и исключения противоречий национальный план действий по радону должен быть, насколько возможно, согласован с решением других проблем, касающихся зданий, таких как обеспечение качества воздуха в помещениях или экономия энергии.

(103) При реализации национального плана действий по радону необходимо сотрудничество национальных, региональных и местных органов власти, компетентных в различных областях (радиологическая защита, здравоохранение, труд, землеустройство, обустройство жилищ, строительство и др.), специалистов различных профессиональных дисциплин (архитекторы и другие специалисты по зданиям, специалисты по радиологической защите, инспекторы санитарных служб, медицинские работники и др.), вспомогательных организаций (эксперты, поддерживающие учреждения, ассоциации и т. д.) и ответственных лиц и организаций.

(104) План действий может содержать как стимулирующие, так и обязательные положения. Учитывая, что ответственность за принятие мер по снижению облучения радоном часто возлагается на людей, от кото-

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

рых нельзя ожидать выполнения детальной оптимизации, план действий должен обеспечивать необходимой информацией, а также оказывать соответствующую поддержку таким людям, чтобы они имели возможность самостоятельно решать вопросы, связанные с облучением радоном, путем самостоятельных действий, таких как измерения или доступ к услугам по измерениям, надлежащая эксплуатация зданий и применение простых методов улучшения ситуации.

(105) Чтобы определить распределение объемной активности радона, представительное для облучения населения страны, следует провести национальное радоновое обследование с использованием признанных средств измерения радона и протоколов. Национальное радоновое обследование должно проводиться с двумя ключевыми целями:

- оценить среднее облучение населения радоном в помещениях и распределение этого облучения. Лучше всего это достигается путем взвешенного по численности населения обследования представительной выборки домов, в которых проведены долгосрочные измерения объемной активности радона;
- определить области, где наиболее вероятно могут быть обнаружены высокие объемные активности радона (например, радоноопасные зоны). Выявление этих областей можно наилучшим образом осуществить в сочетании с долгосрочными измерениями радона в выборке домов.

(106) В качестве инструмента для оптимизации поиска жилых домов и других зданий с высокими объемными активностями радона, а также для выявления территорий, на которых должны приниматься специальные противорадоновые меры при планировании и строительстве новых зданий, могут использоваться радоновые карты. Однако оценки, сделанные на основе этих обследований, должны проверяться дополнительными измерениями в выборке зданий предполагаемой радоноопасной зоны.

(107) Радоноопасные зоны могут быть определены косвенным образом по результатам измерения объемной активности радона в почве (при условии, что существуют установленные коэффициенты перехода к объемной активности радона в домах от объемной активности радона в почве под фундаментом здания) или непосредственно с помощью измерений радона в помещениях. Анализ геологической информации может быть частью этой работы. Однако в разных странах существуют различные определения радоноопасных зон. Они могут быть определены с использованием административного или другого принятого географического деления и основываться на различных критериях, например, на среднем значении

объемной активности (среднее арифметическое, медиана для геометрического распределения), на доле зданий с превышением производного референтного уровня, на вероятности превышения этого уровня и т. п. Определение радоноопасной зоны должно быть приведено в национальном плане действий по радону.

(108) Даже в зоне, радоноопасность которой подтверждена, распределение объемной активности радона в домах часто оказывается достаточно широким, и значения объемной активности радона в большинстве зданий могут быть низкими. Наоборот, даже в районах, не классифицируемых как радоноопасные зоны, могут быть обнаружены дома с высокой объемной активностью радона, хотя и с меньшей вероятностью. Поэтому наряду с выявлением радоноопасных зон следует направить усилия на определение характеристик зданий, с которыми могут быть связаны более высокие объемные активности радона.

(109) Национальный план действий по радону может содержать обязательные положения, особенно в случае юридической ответственности. Например, могут быть предписаны измерения, информирование об их результатах, ведение документации и соблюдение производного референтного уровня. В то же время национальный план действий по радону должен включать стимулирующие меры и меры поддержки, такие как организация кампаний измерений, включение радона в программы по улучшению условий проживания при финансовой поддержке или налоговых льготах там, где это возможно. Такие меры должны регулярно повторяться.

(110) В национальном плане действий следует обратить внимание на все здания с доступом населения и особенно здания с длительным пребыванием населения, такие как школы, детские сады, учреждения социальной помощи, больницы или тюрьмы. Люди, присутствующие в этих зданиях, часто не имеют выбора, потому что вынуждены находиться внутри таких зданий достаточно долгое время. Они могут не знать, что подвергаются облучению при повышенной объемной активности радона и быть не в состоянии уменьшить уровни облучения самостоятельно.

(111) Для зданий со смешанным использованием как населением, так и работниками производный референтный уровень должен быть таким же, как и для жилых помещений. Не рекомендуется применять различные референтные уровни в одном и том же закрытом месте.

(112) Чтобы обеспечить соответствие референтному уровню, должны быть выполнены предупредительные и корректирующие действия. Могут потребоваться мониторинг, а также ведение записей по объемной активности радона. Соответствующая информация должна быть предоставлена представителям населения, использующим здание, и сотрудни-

кам, работающим внутри. Ответственным за данный тип здания должна предоставляться соответствующая поддержка, чтобы они могли выполнять свои обязанности и нести ответственность.

(113) Национальный план действий может предусматривать такой же последовательный подход к зданиям, доступным для населения, как и к рабочим местам, находящимся под контролем национальных органов власти (см. раздел 3.3.5).

4.2. Предотвращение

(114) Стратегия защиты от радона должна включать предупредительные меры (или предотвращение. – *Прим. пер.*), чтобы регулировать облучение радоном в будущем. Независимо от помещения, категории лиц внутри него и типа ситуации облучения проблему облучения радоном можно рассматривать на этапах планирования, проектирования и строительства здания. Предупредительные меры для новых зданий и при реконструкции старых зданий осуществляются посредством введения землеустроительных и строительных норм.

4.2.1. Региональное и местное территориальное планирование

(115) В связи с большим разнообразием факторов, влияющих на поступление радона, особенно геологических условий, невозможно достаточно надежно предсказать уровень объемной активности радона в здании. Эта неопределенность должна быть принята во внимание в ходе региональных и местных работ по территориальному планированию и землеустройству, по крайней мере, в радоноопасных районах. Местные радоновые карты могут быть созданы на основании геологических данных, измерений радона в почве или измерений радона внутри существующих зданий (см. раздел 4.1). Они должны дополняться данными об объемной активности радона в зданиях, в системах водоснабжения из скважин и т. д.

(116) Локальные радоновые карты и другие соответствующие данные должны быть доступными для местных, региональных и национальных органов власти, специалистов по строительству, застройщиков и всего населения, чтобы помочь им в проектировании, строительстве и реконструкции зданий.

(117) Землеустройство может проводиться по предписаниям, и для него радоновые карты остаются удобным инструментом, однако не позволяющим получить определенный результат. Невозможно предсказать объемную активность радона в данном здании до начала строительства.

Дополнительные исследования, например, измерения радона в почве, могут оказаться полезными. Однако поскольку объемная активность радона в здании зависит от многих факторов, только измерение в построенном здании даст окончательный результат. Использование радоновых карт, за исключением очень редких случаев, не должно приводить к появлению зон, в которых строительство зданий запрещено из-за высоких уровней радона.

4.2.2. Строительные нормы и правила

(118) Национальные, региональные и/или местные органы власти должны рассмотреть вопрос о внедрении строительных норм и правил, которые требуют применения предупредительных мер на стадии строительства или капитального ремонта домов и зданий. Реализация предупредительных мер в период проектирования и строительства здания рассматривается как наиболее экономически эффективный способ защиты всего населения. Если все сделано правильно, такие меры будут снижать с течением времени средний по стране уровень радона и уменьшать количество новых домов, где объемная активность радона выше или близка к национальному производному референтному уровню.

(119) Соблюдение строительных норм и правил имеет большое значение. По мере необходимости должны выполняться программы обеспечения качества на уровне профессионалов или на нормативном уровне. Важно отметить, что эти строительные нормы и правила сами по себе не могут гарантировать, что уровни радона в новых зданиях будут ниже производного референтного уровня. Поэтому домовладельцы и управляющие должны знать, что единственный способ узнать о ситуации с радоном в здании – это провести измерения. При необходимости после окончания строительства могут быть рассмотрены меры по снижению облучения радоном.

4.3. Снижение облучения радоном

(120) Национальная стратегия защиты от облучения радоном должна также включать в себя раздел по снижению уровней радона для существующих зданий или мест, где есть закрытые пространства. Независимо от категории лиц, находящихся внутри, должно быть обеспечено регулирование облучения, насколько это возможно, путем управления зданием (или местонахождением) и условиями его использования. Основными шагами являются измерения, а при необходимости и защитные мероприятия.

4.3.1. Методики и протоколы измерения радона

(121) Измерения радона в данном здании или местонахождении должны быть нацелены на получение надежной оценки долгосрочного облучения радоном обитателей, принимая во внимание многие факторы, такие как время нахождения в здании, а также дневные и сезонные вариации объемной активности. Важным и необходимым условием является согласованность и контроль качества измерений радона. Поэтому протокол измерений радона должен быть создан, регулярно пересматриваться и обновляться по мере необходимости. Существуют стандартизованные методы измерения (ISO, 2012a–g).

(122) В идеальном случае долгосрочные измерения в течение всего года имеют преимущество перед краткосрочными оценками. Однако часто выбирают более короткие периоды – от нескольких недель до месяцев, поскольку есть тенденция потери детекторов, когда период измерений становится слишком длинным. Измерения должны быть репрезентативны для среднегодовой объемной активности, может быть проведена сезонная коррекция. Затраты на измерения должны быть низкими или умеренными. Измерительные приборы должны быть легкодоступны, с четкими инструкциями по их использованию. Для проверки эффективности работ по снижению облучения после их проведения необходимы повторные измерения, проводимые в тех же условиях, что при первоначальной оценке. Измерения должны проводиться периодически для уверенности, что ситуация не ухудшается.

(123) При измерениях дочерних продуктов радона в жилищах и на обычных рабочих местах переход к объемной активности радона осуществляется в предположении, по умолчанию, что значение коэффициента равновесия между газообразным радоном и его продуктами распада равно 0,4, если нет данных, свидетельствующих об ином значении.

4.3.2. Методы снижения облучения радоном и их применение в различных ситуациях

(124) Основными способами снижения облучения радоном являются как предотвращение поступления потока радона в помещения, в которых находятся люди, так и удаление радона из воздуха помещений с использованием пассивных и активных методов.

(125) Основные методы снижения объемной активности радона направлены на снижение конвективного и диффузионного поступления радона из почвы под зданием и сфокусированы на следующих действиях:

- усиление герметичности оболочки здания (например, герметизация путей поступления радона);

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

- создание обратного перепада давлений воздуха между внутренним обитаемым пространством и открытым грунтом при помощи различных методов снижения давления (например, снижение давления в почве под зданием, установка системы для удаления радона из почвы, повышение давления в подвале и т. д.).

(126) Другим методом снижения, используемым в жилищах, является уменьшение объемной активности радона путем разбавления наружным воздухом. Снижение достижимо пассивными или активными средствами, которые регулируют вентиляцию помещения. При отоплении или охлаждении помещений может использоваться сбалансированная (приточно-вытяжная) вентиляция. Сбалансированная вытяжная вентиляция не создает ни избытка, ни дефицита давления воздуха внутри помещений по отношению к давлению воздуха в почве и на открытом воздухе. Этот способ вентиляции разбавляет радон после того, как он попал в здание. Вентиляция с помощью механического вентилятора может как разбавить радон после его поступления в здание, так и снизить перепад давления между грунтом и обитаемым пространством. Ряд этих решений не подходит для всех типов зданий, как не подходят они и для всех уровней радона. В некоторых случаях только сочетание этих методов обеспечивает наибольшее снижение объемной активности радона.

(127) Для зданий, где артезианские скважины служат источником водоснабжения, добываемая вода может быть потенциальным источником радона. При выделении радона из воды в воздух помещения (особенно при распылении воды) может происходить существенное кратковременное облучение. Методы снижения поступления радона в окружающий воздух из воды связаны главным образом с дегазацией воды до ее использования или ее фильтрации через слой активированного угля.

(128) Имеются подробные руководства, разработанные национальными или международными организациями, представляющие различные методы снижения облучения радоном (WHO, 2009).

4.4. Строительные материалы

(129) Строительные материалы в целом имеют второстепенное значение для облучения радоном, но в особых случаях могут быть источником радона-222, которым нельзя пренебрегать. Кроме того, обычно единственным источником радона-220 в воздухе помещения является торий в строительных материалах (бетон, кирпич и т. д.). Таким образом, контроль концентрации тория в строительных материалах для поверхностной отделки

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

(штукатурка и т. д.) стен, потолков и полов может уменьшить вероятность повышенных значений объемной активности радона-220 в зданиях. Для предотвращения и оптимизации влияния строительных материалов должны применяться материалы, которые имеют низкий уровень радия-226 и тория-232. Была создана система требований (эффективная удельная активность) для характеристики риска, связанного с гамма-излучением конкретных строительных материалов и определения условий их использования (ЕС, 1999). В целом, если строительные материалы контролируются в отношении гамма-излучения, то эксхалация радона не приведет к значительному по сравнению с производным референтным уровнем повышению объемной активности радона в помещении. Использование строительных материалов, испускающих значительные количества радона-220 или радона-222, требует обоснования.

4.5. Защита работников

(130) На рабочих местах, где облучение радоном не рассматривается в качестве профессионального облучения, радиологическая защита работников обеспечивается так же, как представителей населения. Однако в некоторых случаях, особенно когда на рабочих местах нет доступа посторонним (или их доступ существенно ограничен по времени), в процессе оптимизации могут быть установлены некоторые специфические или дополнительные требования как часть применения последовательного подхода к защите. Такими требованиями могут быть:

- специальные протоколы измерений (например, проведение измерений во время и в месте проведения работ);
- специальное использование производного референтного уровня с учетом фактических параметров облучения, таких как время нахождения или коэффициент равновесия, с сохранением значения 10 мЗв в год в качестве дозового референтного уровня;
- организация условий труда (например, путем ограничения времени пребывания в некоторых помещениях);
- требования, касающиеся осуществления измерений, сообщения их результатов, учета, соблюдения референтного уровня.

(131) Для реализации таких специфических требований может потребоваться внешняя экспертиза, а также надзор со стороны национальных органов.

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

(132) Оперативное управление и национальные органы власти определяют требования, которые должны выполняться на рабочих местах, на которых облучение радоном относится к профессиональному облучению. Требования, относящиеся к облучению радоном:

- определение соответствующего референтного уровня в виде эффективной дозы, объемной активности радона или удельной потенциальной энергии альфа-излучения с учетом времени занятости;
- определение рабочей зоны; хотя термины «контролируемая зона» и «зона наблюдения» не в полной мере соответствуют ситуации, по-прежнему важно правильно определить зоны, в которых может происходить профессиональное облучение, и контролировать надлежащим образом доступ в такие зоны;
- необходимая информация, инструкции и обучение работников;
- использование средств индивидуальной защиты в ряде исключительных случаев;
- мониторинг облучения на основе индивидуального контроля, групповой мониторинг или, если это неуместно, неадекватно или не представляется возможным, основанный на мониторинге рабочего места;
- регистрация облучений;
- обеспечение наблюдения за состоянием здоровья работников;
- стимулирование развития культуры радиологической защиты;
- соответствие референтному уровню. Это требование может включать в себя мониторинг рабочих мест в сочетании с отслеживанием времени в определенных местах работы. Индивидуальные мониторы радона также могут быть использованы либо групповым усреднением или на индивидуальной основе. В любом случае доза порядка 20 мЗв в год не должна быть превышена.

4.6. Защита от радона работников в уранодобывающей отрасли

(133) Национальные власти могут рассматривать облучение радоном на некоторых рабочих местах как относящееся к ситуации планируемого облучения с самого начала. Как правило, к таким рабочим местам относят

урановые рудники. Факторы, которые влияют на это решение, включают уровни облучения от других источников в шахте, в том числе внешнее облучение от гамма-излучения и вдыхание или заглатывание радиоактивной пыли. Радиоактивная пыль урановой руды образуется при добыче и на начальных стадиях измельчения и/или при работах с очищенным продуктом, обычно порошком оксида урана. Дополнительно, в зависимости от процесса, может иметь место потенциальное облучение от других радионуклидов уранового ряда. В урановых рудниках продукты распада радона могут быть основным источником радиационного облучения. Защита работников от облучения радоном в отраслях добычи урана и тория относится к ответственности оперативного управления.

(134) В соответствии с системой МКРЗ облучение в ситуации планируемого облучения должно регулироваться посредством процесса оптимизации с использованием граничных доз, так же, как и использованием пределов дозы. В идеале граничные дозы должны быть определены на стадии проектирования рабочего процесса. С учетом использования различных подходов и методов добычи на месторождениях радиоактивных руд характеристики горнодобывающих предприятий сильно варьируют. В результате граничные дозы, а также результаты оптимизации будут различаться между шахтами и в некоторых случаях меняться с течением времени на одной и той же установке при изменении физических условий.

(135) Принципы, используемые для контроля профессионального облучения радоном и дочерними продуктами радона в урановых рудниках, аналогичны тем, которые используются для других рабочих мест в ситуациях планируемого облучения. Процесс начинается с тщательного проектирования рабочего места и применения соответствующих технических средств для ограничения и контроля облучения радоном. В некоторых случаях вероятность очень изменчивого и/или высокого облучения радоном и дочерними продуктами радона в урановых рудниках повышена из-за относительной мощности источника и других физических ограничений (например, подземного характера работ). В этих случаях дополнительное внимание должно быть уделено деталям программы мониторинга для обеспечения адекватной оценки условий труда и дозы облучения работников. В ситуациях с высокой и переменной объемной активностью радона следует предусматривать такие стратегии, как мониторинг в режиме реального времени и применение индивидуальных дозиметров. Наоборот, в ситуации с низкой и стабильной объемной активностью радона и его дочерних продуктов может быть достаточным периодический контроль на рабочем месте. Если применяется активная вентиляция рабочих мест, для оценки облучения дочерними продуктами радона обычно не следует по-

лагаться на данные об объемной активности радона и предположении о сдвиге равновесия. Поэтому необходимо проводить измерения объемной активности продуктов распада радона (или удельной потенциальной энергии альфа-излучения).

(136) Переход от экспозиций по дочерним продуктам радона к дозам требует использования коэффициентов дозового перехода. В прошлом коэффициенты дозового перехода для дочерних продуктов радона были основаны на эпидемиологических исследованиях (ICRP, 1993). В настоящее время Комиссия предлагает рассчитывать коэффициенты перехода к эффективной дозе, обусловленной дочерними продуктами радона, использовать референтные биокинетические и дозиметрические модели с установленными коэффициентами качества излучения и тканевыми весовыми коэффициентами (ICRP, 2010). Эти дозовые коэффициенты заменят условный дозовый переход, основанный на эпидемиологии.

4.7. Взаимодействие заинтересованных сторон

(137) Первым шагом по обеспечению поддержки национальной радоновой стратегии является привлечение внимания к проблеме, которой во многих странах уделяется очень мало внимания. Легкодоступная информация о том, что такое радон, как он может накапливаться внутри закрытых пространств, какой риск с ним связан и как в целом выявить и снизить высокую объемную активность радона, – должна распространяться среди всего населения, особенно среди выборных представителей, гражданских служащих административных подразделений, владельцев домов, землевладельцев, работодателей, родителей школьников и т. д.

(138) Наличие подготовленных профессионалов в области радона (строителей, архитекторов, специалистов по радиологической защите, работодателей, профсоюзных активистов и работников) поможет укрепить уверенность в том, что рекомендованные меры по предупреждению и снижению облучения были правильно спроектированы, спланированы и реализованы. Программы обучения профессионалов должны быть неотъемлемой частью национального плана действий по радону, чтобы домовладельцы или собственники недвижимости с объемной активностью радона выше или близкой к производному референтному уровню имели доступ к инфраструктуре по профилактике радона и его снижению. Соответствующая информация и обучение должны быть также предоставлены другим заинтересованным специалистам (в области здравоохранения, недвижимости и т. д.).

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

(139) Так как при оценке риска развития рака легкого был продемонстрирован синергизм радона и курения, то взаимосвязь программ общественного здравоохранения по снижению радона и стратегии борьбы с курением оправдана, по крайней мере, с точки зрения предупреждения.

(140) Национальный план действий по радону может содержать информацию о стоимости и эффективности как предупредительных мер, так и мер по снижению облучения. Необходим постоянный сбор данных на различных уровнях (т. е. локальном, региональном и национальном), эти данные должны быть доступны различным заинтересованным сторонам.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

(141) Цель настоящего доклада состоит в том, чтобы представить обновленное руководство по радиологической защите при облучении радоном с учетом развития системы радиологической защиты (ICRP, 2006b, 2007), новых знаний относительно риска облучения радоном для здоровья (UNSCEAR, 2009; WHO, 2009; ICRP, 2010) и опыта, накопленного многими странами и международными организациями за последние годы.

(142) В предыдущих Рекомендациях по этой проблеме (ICRP, 1993, 2007) Комиссия предлагала стратегию, основанную на различных подходах к защите для жилищ и для рабочих мест. В настоящее время Комиссия рекомендует единый подход для защиты от облучения радоном во всех зданиях, независимо от их назначения и находящихся в них лиц. Стратегия защиты в жилищах, реализованная в национальном плане действий, основана на применении принципа оптимизации ниже производного референтного уровня, установленного по объемной активности в воздухе. Комиссия настоятельно призывает национальные власти установить национальный производный референтный уровень на разумно достижимом низком уровне в диапазоне от 100 Бк·м⁻³ до 300 Бк·м⁻³ с учетом существующих экономических и социальных факторов.

(143) Цель этого нового подхода, последовательно дифференцированного согласно ситуации облучения, – эффективный охват всех зданий с точки зрения общественного здравоохранения (жилища, многофункциональные здания и общие рабочие места) как минимум в пределах радоноопасных зон. Комиссия подчеркивает важность предупредительных мер, главным образом связанных со строительными нормами, для всех типов зданий.

(144) В докладе также представлено руководство по управлению такими ситуациями облучения радоном, в которых облучение работников является профессиональным. Руководство охватывает ситуации облучения, когда соответствие референтному уровню не может быть достигнуто, или ситуации включены в национальный перечень видов деятельности или объектов, созданный национальными органами власти. В этом случае стратегия защиты основывается на применении принципа оптимизации и соответствующих требований к профессиональному облучению. Предел

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

дозы профессионального облучения должен применяться, когда национальные органы власти считают, что ситуация облучения радоном должна регулироваться как ситуация планируемого облучения.

(145) Рекомендую простой, единый и последовательный подход для большинства ситуаций облучения радоном, Комиссия ожидает снижения облучения радоном, который в настоящее время является основным источником облучения населения в мире.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cothorn C.R., Smith Jr. J.E. 1987. Environmental Radon. Plenum Press, New York, pp. 98–107.
2. Darby S., Hill D., Auvinen A. et al. 2005. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case–control studies. *BMJ* 330, 223–227.
3. Darby S., Hill D., Deo H. et al., 2006. 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. *Scand. J. Work Environ. Health* 32 (Suppl. 1), 1–84.
4. EC, 1999. Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials. Radiation Protection 112. European Commission, Luxembourg.
5. EPA, 1999. Proposed Methodology for Assessing Risks from Indoor Radon Based on BEIR VI. Office of Radiation and Indoor Air, United States Environmental Protection Agency, Washington, DC.
6. EPA, 2003. Assessment of Risks from 1106 Radon in Homes. Publication EPA 402-R-1107 03-003. Office of Air and Radiation, United States Environmental Protection Agency, Washington, DC.
7. EURATOM, 2014. Council Directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013 laying down basic safety standards for the protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation. *Off. J. Eur. Union* L 13, 1–73. Available at: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2014:013:0001:0073:EN:PDF> (last accessed 3 May 2014).
8. Haerting F.H., Hesse W. 1879. Der Lungenkrebs, die Bergkrankheit in den Scneeberger Gruben. *V. gericht. Med. O` ff. Gesund Wes.* 30, 296–309 and 31, 102–132, 313–337 (in German with English abstract).
9. HPA, 2009. Radon and Public Health. Report of the Independent Advisory Group on Ionising Radiation. Health Protection Agency, Chilton.
10. Hultqvist B. 1956. Studies on Naturally Occurring Ionising Radiations. Thesis. *K. Svenska Vetensk Akad. Handl.* 6 (3). Almqvist u. Wiksells Boktryckeri, Stockholm.

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

11. IAEA, FAO, ILO, OECD/NEA, PAHO, UNEP, WHO, 2011. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards – Interim Edition. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3 (Interim). International Atomic Energy Agency, Vienna. Available at: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/p1531interim_web.pdf (last accessed 3 May 2014).
12. IARC, 1988. Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans: Man-made Fibres and Radon. IARC Vol. 43. International Agency for Research on Cancer, Lyon.
13. ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1–3).
14. ICRP, 1993. Protection against radon-222 at home and at work. ICRP Publication 65. Ann. ICRP 23(2).
15. ICRP, 2006a. Human alimentary tract model for radiological protection. ICRP Publication 100. Ann. ICRP 36(1/2).
16. ICRP, 2006b. The optimisation of radiological protection: broadening the process. ICRP Publication 101, Part 2. Ann. ICRP 36(3).
17. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37(2–4).
18. ICRP, 2009. Application of the Commission's recommendations to the protection of people living in long-term contaminated areas after a nuclear accident or a radiation emergency. ICRP Publication 111. Ann. ICRP 39(3).
19. ICRP, 2010. Lung cancer risk from radon and progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115. Ann. ICRP 40(1).
20. ICRP, 2014a. Occupational intakes of radionuclides Part 1. Ann. ICRP (in press).
21. ICRP, 2014b. Occupational intakes of radionuclides Part 3. Ann. ICRP (in preparation).
22. ISO, 2012a. 11665 – Part 1: Radon-222 and its Short-lived Decay Products in the Atmospheric Environment: their Origins and Measurement Methods. International Standards Organisation, Geneva.
23. ISO, 2012b. 11665 – Part 2: Radon-222: Integrated Measurement Methods for the Determination of the Average Potential Alpha Energy Concentration of Short-lived Radon Decay Products in the Atmospheric Environment. International Standards Organisation, Geneva.
24. ISO, 2012c. 11665 – Part 3: Radon-222: Spot Measurement Methods of the Potential Alpha Energy Concentration of Short-lived Radon Decay

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

- Products in the Atmospheric Environment. International Standards Organisation, Geneva.
25. ISO, 2012d. 11665–Part 4: Radon-222: Integrated Measurement Methods for the Determination of the Average Radon Activity Concentration in the Atmospheric Environment Using Passive Sampling and Delayed Analysis. International Standards Organisation, Geneva.
 26. ISO, 2012e. 11665 – Part 5: Radon-222: Continuous Measurement Methods of Radon Activity Concentration in the Atmospheric Environment. International Standards Organisation, Geneva.
 27. ISO, 2012f. 11665 – Part 6: Radon-222: Spot Measurement Methods of Radon Activity Concentration in the Atmospheric Environment. International Standards Organisation, Geneva.
 28. ISO, 2012g. 11665 – Part 7: Radon-222: Methods for Estimation of Surface Exhalation Rate by Accumulation Method in the Environment. International Standards Organisation, Geneva.
 29. Krewski D., Lubin J.H., Zielinski J.M., et al., 2006. A combined analysis of North American case–control studies of residential radon and lung cancer. *J. Toxicol. Environ. Health Part A* 69, 533–597.
 30. Lubin J.H., Tomasek L., Edling C. et al., 1997. Estimating lung cancer mortality from residential radon using data for low exposures of miners. *Radiat. Res.* 147, 126–134.
 31. Lubin J.H., Wang Z.Y., Boice Jr. J.D. et al., 2004. Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies. *Int. J. Cancer* 109, 132–137.
 32. Ludewig P., Lorenzer E. 1924. Untersuchungen der Grubenluft in den Schneeberger Gruben auf den Gehalt von Radium-Emanation. *Z. Phys.* 22, 178–185.
 33. Marsh J.W., Bailey M.R. 2013. A review of lung-to-blood absorption rates for radon progeny. *Radiat. Prot. Dosim.* 157, 499–514.
 34. Marsh J.W., Harrison J.D. Laurier, D. et al., 2010. Dose conversion factors for radon: recent developments. *Health Phys.* 99, 511–516.
 35. NRC, 1998. Health Effects of Exposure to Radon. BEIR VI Report. National Research Council, Washington, DC.
 36. Skeppström K., Olofsson B., 2007. Uranium and radon in groundwater: an overview of the problem. *Eur. Water* 17/18, 51–62.
 37. STUK, 2008. Indoor Radon Mitigation. STUK-A229. Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK), Helsinki (in Finnish).
 38. Tomášek L., Rogel A., Tirmarche M., et al., 2008. Lung cancer in French and Czech uranium miners – risk at low exposure rates and modifying

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

- effects of time since exposure and age at exposure. *Radiat. Res.* 169, 125–137.
39. UNSCEAR, 2000. UNSCEAR 2000 Report: Annex B. Exposure from Natural Radiation Sources. United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.
 40. UNSCEAR, 2009. UNSCEAR 2006 Report: Annex E: Source-to-effects Assessment for Radon in Homes and Workplaces. United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.
 41. WHO, 1986. Indoor Air Quality Research: Report on a WHO Meeting, Stockholm, 27–31 August 1984. World Health Organization, Copenhagen.
 42. WHO, 2009. WHO Handbook on Indoor Radon. A Public Health Perspective. World Health Organization, Geneva.
 43. Winkler R., Ruckerbauer F., Bunzl K., 2001. Radon concentration in soil gas: a comparison of the variability resulting from different methods, spatial heterogeneity and seasonal fluctuations. *Sci. Total Environ.* 272, 273–282.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Научное издание

ПУБЛИКАЦИЯ 126 МКРЗ

РАДИОЛОГИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ОТ ОБЛУЧЕНИЯ РАДОНОМ

Переводчики: д.т.н., профессор *М. В. Жуковский*,
к.ф.-м.н. *И. В. Ярмошенко*

Редакторы русского перевода:
д.т.н., профессор *М. В. Жуковский*,
к.ф.-м.н. *И. В. Ярмошенко*,
к.б.н. *С. М. Киселев*

Перевод: *М.В. Жуковский*,
И.В. Ярмошенко,

Предисловие и редакция:
С.М. Киселев
М.В. Жуковский
И.В. Ярмошенко

Корректор: *М.Э. Чупрякова*

Компьютерная верстка и оформление:
И.В. Схерпениссе

Подписано в печать
Формат 60x90 1/16. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 5,35.
Тираж 600 экз. Зак. № В277

Отпечатано в типографии
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России
123182, г. Москва, ул. Живописная, д. 46

ISBN 978-5-905926-06-8



9 785905 926068