

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
ANNOTATION	12
INTRODUCTION.....	13
ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	18
ГЛАВА 1. Радиоактивность и основы дозиметрии	21
1.1. Явление радиоактивности и основные дозиметрические характеристики.....	21
1.2. Классификация источников облучения населения	32
1.3. Основные изотопы радона и нормирование радонового облучения	36
1.4. Биологические эффекты от облучения радоном и его дочерними продуктами распада	43
1.5. Методы и средства измерения уровней радона в воздухе помещений	47
ГЛАВА 2. Современное состояние радоновой проблемы в Российской Федерации и за рубежом	57
2.1. Радоновые исследования в зарубежных странах	57
2.2. Исследования уровней радона в зданиях на территории Российской Федерации и постсоветских государств.....	77
ГЛАВА 3. Исследование закономерностей переноса радона в пористой среде.....	94
3.1. Критерии и признаки радоноопасности.....	94
3.2. Общие закономерности переноса радона в пористой среде.....	96
3.3. Плотность потока радона как критерий радоноопасности территорий застройки.....	101
3.4. Экспериментальное определение параметров диффузионного переноса в пористой среде.....	122

3.5. Экспериментальное исследование закономерностей поступления радона в здания равнинных территорий.....	128
ГЛАВА 4. Модельное исследование переноса радона в системе сред «грунт — атмосфера — здание».....	141
4.1. Расчет радоновой нагрузки на заглубленные ограждающие конструкции.....	141
4.2. Математическое описание диффузионного переноса радона из грунта в здание.....	150
ГЛАВА 5. Противорадоновая защита зданий и сооружений	162
5.1. Цели радиационно-геологических изысканий.....	162
5.2. Расчет параметров противорадоновой защиты	163
5.3. Принципы противорадоновой защиты зданий.....	173
5.4. Технические решения защиты от радона.....	176
5.4.1. Пассивные технологии защиты зданий от радона	176
5.4.2. Активные технологии защиты зданий от радона	185
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	191
ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	194
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	200
СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ГУЛАБЯНЦА ЛОРЕНА АРАМОВИЧА.....	216
ПРИЛОЖЕНИЯ	220
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	229

*Посвящается памяти
Гулабянца Лорена Арамовича,
доктора технических наук, профессора,
заслуженного строителя РФ, заведующего лабораторией
радиационной безопасности в строительстве НИИ
Строительной физики РААСН*



Гулабянц Лорен Арамович (1939–2017)

ВВЕДЕНИЕ

Права человека на жизнь и здоровье гарантированы Конституцией Российской Федерации, а их реализация является важнейшей государственной задачей. Поэтому безопасность человека должна обеспечиваться на протяжении всей его жизни по всем значимым факторам риска, число которых непрерывно увеличивается по мере развития общества, техники и технологий.

Около половины причин диагностируемых в настоящее время заболеваний обусловлены качеством окружающей среды, а поскольку современный человек проводит порядка 80 % времени в зданиях, то создание безопасной внутренней среды является актуальной научно-прикладной задачей. На человека в здании может одновременно воздействовать более десятка вредных и опасных факторов физической и химической природы, но, безусловно, наиболее интенсивным является радиационное облучение. Действие ионизирующих излучений причиняет значительный социальный и экономический ущерб, приводя к ухудшению генофонда населения Российской Федерации, поэтому обеспечение радиационной безопасности объектов строительства отвечает концепции сохранения генофонда населения страны.

Опасность повышенного радиоактивного облучения у большинства людей ассоциируется с авариями на предприятиях ядерно-топливного цикла или нарушениями правил обращения с радиоактивными веществами. На самом же деле, население Земли большую часть индивидуальной годовой дозы облучения получает в жилых и общественных зданиях: согласно данным Научного комитета по действию атомной радиации ООН (НКДАР ООН) радонном и его дочерними продуктами распада (ДПР) формируется порядка 70 % дозы облучения населения в странах с умеренным климатом.

В результате широкомасштабных исследований, проводившихся в рамках специальных государственных программ в странах Европы и Северной Америки, выяснилось, что практически

в каждой стране существуют группы населения, получающие крайне высокие дозы облучения в бытовых условиях. В Российской Федерации также существует ряд регионов с повышенными уровнями облучения населения естественными источниками ионизирующего излучения, давно известна аномальная радоноопасность территорий Республики Алтай, Еврейского автономного округа и района Кавказских Минеральных Вод.

Радон представляет собой природный источник радиоактивного излучения, одноатомный радиоактивный газ, не имеющий стабильных изотопов и образующийся в геологической среде при распаде материнского радия. Радон присутствует во всех трех радиоактивных семействах, но наибольший вред здоровью наносит его основной изотоп ^{222}Rn , имеющий период полураспада 3,8 суток, и потому способный мигрировать от места образования на значительные расстояния. Два остальных изотопа ^{220}Rn и ^{219}Rn (торон и актинон) имеют периоды полураспада менее одной минуты, а потому не могут переноситься из грунта в здания.

Когда говорят об облучении радоном, то имеют в виду совместное внутреннее облучение радоном и всеми его короткоживущими дочерними продуктами распада. Именно последние (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi и ^{214}Po) формируют практически всю дозу облучения легких, на сам радон приходится не более 2 %. Распознать присутствие радона и его продуктов распада по вкусу, цвету или запаху невозможно.

Радон отнесен к канцерогенам первой группы, его повышенная концентрация и присутствие неизбежно сопутствующих ему дочерних продуктов распада в воздухе помещений ведет к облучению внутренних органов, способному вызывать рак легких. Облучение радоном занимает второе место после курения среди причин смертности от рака легких, причем эти факторы оказывают мультипликативное действие: ущерб от их совместного действия многократно превосходит сумму ущербов от действия каждого из факторов в отдельности. Вероятность возникновения заболеваний главным образом зависит от продолжительности и интенсивности облучения, а также от состояния здоровья облучаемого.

Среднее (фоновое) содержание радона в атмосферном воздухе невелико, в приземном слое оно редко превышает 10 Бк/м^3 , а потому на открытой местности радон не несет вреда здоровью

человека. Но при определенных условиях он способен поступать из грунта в здание и накапливаться в воздухе помещений. Можно с полной уверенностью утверждать, что радон оказался одним из природных факторов, воздействие которого на население многократно усилилось в результате технического прогресса, вследствие чего в радиационной экологии возникло понятие техногенно измененного (усиленного) радиационного фона.

Требования ограничения величины облучения населения природными источниками радиации в зданиях нашли отражение в Федеральных Законах № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» и № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». С целью их выполнения Нормами радиационной безопасности НРБ-99/09 и Основными санитарными правилами обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99/2010 установлены предельные допустимые уровни радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий. Однако данные уровни с позиций безопасности не являются оптимальными, они определены с учетом реальных технических и экономических возможностей государства. Поэтому следует стремиться к максимальному, социально и экономически обоснованному снижению концентрации радона в зданиях, а в перспективе — достижению состояния, при котором уровни внутреннего радона не будут существенно отличаться от его уровней в атмосфере.

Технические мероприятия, направленные на обеспечение в здании минимального обоснованного уровня радона, реализуются исключительно строительными средствами. Их суть состоит в проектировании и строительстве таких подземных ограждающих конструкций, которые, выполняя заложенные в них несущие функции, еще и эффективно препятствуют поступлению радона из грунта в здание. На радоноопасных территориях качестве дополнительной меры защиты в зданиях могут устанавливаться системы вентиляции, создающие избыточное давление в жилой зоне или удаляющие воздух с высоким содержанием радона. Однако на равнинных территориях со средним содержанием радия в грунте (до 50 Бк/кг) приемлемые уровни радона в воздухе помещений могут и должны быть достигаться исключительно пассивными технологиями.

Проблема обеспечения радонобезопасности объектов строительства стала актуальной менее 50 лет назад. Выявление

в Скандинавии зданий с ураганными активностями радона (порядка $200\,000\text{ Бк/м}^3$) дало толчок радоновым исследованиям по всему миру. Вскоре было установлено, что величина дозы облучения радоном в помещениях является управляемой компонентой радиационного риска и может быть существенно снижена строительными технологиями. Необходимость разработки средств и методов снижения дозы бытового облучения привела к появлению нового направления строительной физики — радиационной безопасности зданий и сооружений.

В Российской Федерации исследованием радоновой проблемы занимаются организации различной ведомственной принадлежности: более 25 лет изучение закономерностей поступления и накопления радона в зданиях и сооружениях ведется в НИИ Строительной физики РААСН Минстроя России, радиационно-экологические аспекты облучения радоном с начала 1990-х являются главным направлением работы Института промышленной экологии УрО РАН (г. Екатеринбург), изучению закономерностей переноса радона в пористых средах посвящены труды геофизиков Института геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН и Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, медико-биологические эффекты облучения продуктами распада радона системно исследуются в НТЦ радиационной и химической безопасности ФМБА России и НИИ радиационной гигиены им. профессора П. В. Рамзаева (г. Санкт-Петербург), ряде других исследовательских институтов. Большой объем работ по изучению уровней радона в зданиях определенных территорий (по большей части — потенциально радоноопасных) выполнен преподавателями учреждений высшего образования, существенный вклад в совершенствование методов и средств измерения активности радона внесли работы сотрудников НТЦ Амплитуда (г. Зеленоград).

Несмотря на разнообразие исследовательских подходов, радоновая тематика все еще относительно нова для многих специалистов строительной отрасли, а целый ряд аспектов данной проблемы находится в стадии решения. Этим частично объясняется ограниченное число отечественных литературных источников, сочетающих теоретические и практические аспекты реализации противорадоновой защиты зданий. В 2013 г. Л. А. Гулабянцем было издано «Пособие по проектированию противорадоновой защиты жилых и общественных зданий», в котором кратко изложены основные

подходы к обеспечению радонобезопасности зданий. Также следует отметить монографию ученых ИПЭ УрО РАН «Радоновая безопасность зданий» (М. В. Жуковский, А. В. Кружалов, В. Б. Гурвич, И. В. Ярмошенко), в которой проведен анализ факторов, влияющих на уровень объемной активности радона в помещениях, и вышедший не так давно фундаментальный труд коллектива НИИ радиационной гигиены им. профессора П. В. Рамзаева «Природные источники ионизирующего излучения: дозы облучения, радиационные риски, профилактические мероприятия», в котором представлена информация о радоновой ситуации во всех без исключения регионах России. С июня 2018 введен в действие Свод правил «Здания жилые и общественные. Правила проектирования противорадоновой защиты», разработанный в НИИ Строительной физики коллективом лаборатории радиационной безопасности в строительстве под руководством Л. А. Гулабянца.

В данной монографии рассматривается более широкий круг вопросов, имеющих непосредственное отношение к радоновой тематике. Приведены краткие сведения об истории возникновения радоновой проблемы, изложены современные представления об основных явлениях и процессах, обуславливающих необходимость и определяющих способы осуществления защиты от радона при строительстве современных зданий. Значительное внимание уделено изложению основ знаний о явлении радиоактивности, дозах облучения, механизмах и последствиях облучения радоном, теории переноса радона и ряда других вопросов, ознакомление с которыми необходимо для понимания смысла практически решаемых задач противорадоновой защиты.

Монография, в первую очередь, адресована специалистам строительной отрасли для использования при проектировании противорадоновой защиты новых зданий, а также существующих зданий, подлежащих реконструкции, восстановлению или реставрации. Она также может быть использована при разработке мероприятий по нормализации радоновой обстановки в эксплуатируемых и подлежащих капитальному ремонту зданиях. В то же время, представленный материал может быть полезен и более широкому кругу читателей, интересующихся проблемами экологической безопасности современного строительства.

ANNOTATION

The monograph is devoted to a relatively new direction in building physics — radon safety of constructions. It outlines the physical foundations of radioactivity and dosimetry, analyzes the current state of the radon problem in Russia and abroad, presents the results of theoretical and experimental studies of the factors forming the radon environment in a building. Based on the diffusion model of radon transport in the soil and underground walling, a simple and effective engineering method is proposed to ensure the required radon-protective characteristics of buildings. The monograph also provides an extensive overview of modern technologies for reducing the supply of radon to buildings.

The monograph is intended for specialists in radiation safety of construction and radioecology, while it will be of interest to a wide range of people interested in aspects of human exposure to ionizing radiation. The material of monograph can be used in the design of radon protection for buildings under construction and reconstruction, as well as in the development of measures aimed at normalizing the radon situation in operated buildings and constructions to be renovated.

INTRODUCTION

Human rights to life and health are guaranteed by the Constitution of the Russian Federation, and their implementation is the most important state task. Therefore, the man safety must be ensured throughout his life for all significant risk factors, the number of which is constantly increasing with the development of society, technics and technology.

About half of the causes of currently diagnosed diseases are due to the environment quality and since a modern person spends about 80 % of the time in buildings, the safe internal environment creation is an urgent scientific and applied problem. People in a building can be simultaneously affected by more than a ten harmful and dangerous factors of physical and chemical nature, but radiation exposure is the most intense of them. The ionizing radiation action causes a significant social and economic damage, leading to deterioration in the gene pool of the Russian Federation population. Therefore, ensuring the constructions radiation safety meets the concept of preserving the gene pool of the country's population.

The danger of increased radioactive exposure for most people is associated with accidents at nuclear fuel cycle plants or violations of the rules for handling radioactive substances. In fact, the Earth population receives most of the individual annual radiation dose in residential and public buildings. According to the UN Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) radon and its progeny form about 70 % of the population radiation dose in countries with temperate climates.

As a result of large-scale studies carried out within the framework of special government programs in Europe and North America, it turned out that in almost every country there are population groups receiving extremely high doses of radiation in a domestic environment. There are also a number of regions with increased population exposure levels to natural ionizing radiation sources in the Russian Federation. The territories of the Altai Republic, the Jewish Autonomous district and the Caucasian Mineral Water region have anomalous radon hazard.

Radon is a source of natural radiation, a monatomic radioactive gas that does not have stable isotopes and is formed in the geological environment during the decay of parent radium. Radon is present in all three radioactive families, but the greatest harm to health is caused by its main isotope ^{222}Rn , which has a half-life of 3.8 days and is therefore capable of migrating from the generation place over considerable distances. The other two isotopes ^{220}Rn and ^{219}Rn (thoron and actinone) have half-lives of less than one minute and cannot be transferred from the soil into the buildings.

When we talk about radon exposure, we mean joint internal exposure to radon and all of its short-lived progeny (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi and ^{214}Po), which form almost the entire dose of lungs radiation, radon itself accounts for no more than 2 %. It is impossible to recognize the presence of radon and its decay products by taste, color or smell.

Radon is classified as a first group carcinogen, its increased concentration and the presence of inevitably accompanying daughter decay products in the indoor air leads to irradiation of internal organs that can cause lung cancer. Radon exposure ranks second after smoking among the causes of death from lung cancer, and these factors have a multiplicative effect: the damage from their combined action is many times greater than the sum of damage from the action of each of the factors separately. The disease occurrence probability mainly depends on the exposure duration and intensity, as well as on the health state of the exposed person.

The average (background) radon concentration in the outdoor air is small, it rarely exceeds 10 Bq/m^3 in the surface layer, and therefore radon does not harm human health in open areas. But under certain conditions, it is able to flow from the soil into the building and accumulate in the indoor air. It can be stated with complete confidence that radon turned out to be one of the natural factors, which impact on the population has increased many times over as a result of technological progress and the concept of a technologically modified (enhanced) radiation background has arisen in radiation ecology.

Requirements to limit the population exposure amount from the natural radiation sources in buildings are reflected in Federal Laws No. 3 “On radiation safety of the population” and No. 384 “Technical regulations on the safety of buildings and structures”. In order to fulfill them, the Radiation Safety Standards NRB-99/09 and the Basic Sanitary Rules for Ensuring Radiation Safety OSPORB-99/2010 set the maximum

permissible levels of radon in the air of residential and public buildings. However, these levels are not optimal from the security standpoint; they are determined taking into account the real technical and economic capabilities of the state. Therefore, it is necessary to strive for the maximum, socially and economically justified decrease of radon concentration in buildings and in the long term - the achievement of a state in which the indoor radon levels will not significantly differ from its levels in the outdoor air.

Technical measures aimed at ensuring the minimum justified radon level in the building are implemented exclusively by construction means. Their essence is in the design and construction of such underground walling, which, fulfilling the load-bearing functions inherent in them, also effectively prevent the radon flow from the soil into the building. In radon-hazardous areas, as an additional measure of protection in buildings, ventilation systems can be installed that create excessive pressure in the residential area or remove air with a high radon concentration. However, in flat areas with an average radium content in the soil (up to 50 Bq/kg), acceptable levels of indoor radon can and should be achieved exclusively with passive technologies.

The problem of ensuring constructions radon safety became relevant less than 50 years ago. The identification buildings with hurricane radon activity (about 200,000 Bq/m³) in Scandinavia gave impetus to radon research around the world. It was soon established that the magnitude of the radon dose in rooms is a controllable component of radiation risk and can be significantly reduced by construction technologies. The need to develop means and methods for reducing the dose of household exposure led to the emergence of a new direction in building physics — radiation safety of construction objects.

In the Russian Federation, organizations of various departmental affiliations are engaged in the study of the radon problem. For more than 25 years the study of the regularities of the radon entry and accumulation in buildings and structures has been conducted at the Russian Academy of Architecture and Building Science Research Institute of Building Physics. The ecological aspects of radon exposure have been the main focus of the Institute of Industrial Ecology UB RAS (Ekaterinburg) works since the early 1990s, the study of the regularities of radon transport in porous environments are devoted to the geophysicists works of Sergeev Institute of Environmental Geoscience Russian Academy of Sciences and the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian

Academy of Sciences. The medico-biological effects of radon progeny exposure are systematically studied at the Scientific and Technical Center for Radiation and Chemical Safety of Russia and the Professor Ramzaev Research Institute of Radiation hygiene (St. Petersburg) and a number of other research institutes. A large amount of work on the study of radon levels in buildings of certain territories (for the most part, potentially radon-hazardous) was carried out by lecturers of higher education institutions, a significant contribution to the improvement of methods and means of measuring radon activity was made by the work of the staff of the Scientific and Technical Center Amplitude (Zelenograd).

Despite the variety of research approaches, the radon topic is still relatively new for many specialists in the construction industry, and a number of this problem aspects are being addressed. This partially explains the limited number of domestic literary sources that combine theoretical and practical aspects of the buildings radon protection implementation.

In 2013 Gulabyants L. published “A guide for the design of residential and public buildings radon protection”, which summarizes the main approaches to ensuring the radon safety of buildings. It is also noteworthy to mention the monograph of the scientists of the Institute of Industrial Ecology Ural Branch of Russian Academy of Sciences “Radon safety of buildings” (Zhukovsky M., Kruzhalov A., Gurvich V. and Yarmoshenko I.), which analyzes the factors affecting the level of radon concentration in the premises, and recently published fundamental work of the Professor Ramzaev Research Institute of Radiation hygiene staff “Natural sources of ionizing radiation: radiation doses, radiation risks, preventive measures”, which provides information on the radon situation in all regions of Russia without exception. Since June 2018, the Code of Rules “Residential and public buildings. Rules for the design of radon protection”, developed at the Russian Academy of Architecture and Building Science Research Institute of Building Physics staff of the radiation safety in construction laboratory under the Gulabyants L. leadership.

This monograph examines a wider range of issues that are directly related to radon topics. Brief information about the history of the radon problem occurrence is given, modern ideas about the main phenomena and processes that determine the need and the ways of implementing protection against radon in the construction of modern buildings are presented. Considerable attention is paid to the presenta-

tion of the fundamentals knowledge about the radioactivity phenomenon, radiation doses, mechanisms and consequences of exposure to radon, the theory of radon transport and a number of other issues, familiarization with which is necessary to understand the meaning of practically solved radon protection problems.

The monograph is primarily addressed to specialists in the construction industry for use in the design of radon protection for new buildings, as well as existing buildings subject to reconstruction, restoration or restoration. It can also be used in the development of measures to normalize the radon situation in the buildings in operation and subject to major repairs. At the same time, the presented material can be useful to a wider circle of readers interested in the problems of modern construction environmental safety.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- A — активность, Бк
- A_{Rn} — объемная активность (концентрация) радона, Бк/м³
- $A_{эфф}$ — удельная эффективная активность, Бк/кг
- a — поток радона, Бк/с
- C_K — удельная активность калия-40, Бк/кг
- C_{Ra} — удельная активность радия-226, Бк/кг
- C_{Th} — удельная активность тория, Бк/кг
- c_{Rn} — молярная концентрация радона, моль/м³
- D — поглощенная доза, Гр
- D_o — объемный коэффициент диффузии радона, м²/с
- $D_{эке}$ — «эквивалентный» коэффициент диффузии радона, м²/с
- $D_{эф}$ — эффективный коэффициент диффузии радона, м²/с
- E — эффективная эквивалентная доза, Зв
- E_p — коллективная эффективная доза, чел.-Зв
- F — коэффициент сдвига радиоактивного равновесия
- G — скорость образования радона в пористой среде, Бк/(м³·с)
- H — эквивалентная доза, Зв
- h — толщина слоя материала или грунта, м
- h — высота здания, м
- K — коэффициент радонопроницания слоя материала или конструкции, м/с.

k	— воздухопроницаемость слоя материала или вещества, м^2
$k_{эм}$	— коэффициент эманирования радона материалом грунтом или материалом конструкции
$k_{ДР}$	— коэффициент бародиффузии
$k_{ДТ}$	— коэффициент термодиффузии
L	— длина диффузии радона в материале или веществе, м
n	— кратность воздухообмена, ч^{-1} и с^{-1}
P	— давление газа, Па
P_D	— мощность поглощенной дозы, Зв
P_H	— мощность эквивалентной дозы, Зв
q	— плотность потока радона, $\text{Бк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$
R	— сопротивление радонопроницанию слоя материала, $\text{с}/\text{м}$
S	— площадь пола, м^2
t	— время, с
T	— температура, $^{\circ}\text{C}$ и K
$T_{1/2}$	— период полураспада радионуклида, с
V	— объем помещения, м^3
v	— скорость конвективного потока, $\text{м}/\text{с}$
W	— коэффициент качества излучения
W_s	— активность радона в слое материала или грунта, $\text{Бк}/\text{м}^3$
α	— вид корпускулярного излучения, поток ядер гелия
β	— вид корпускулярного излучения, поток электронов или позитронов
β	— коэффициент извилистости для пористой среды
γ	— вид электромагнитного излучения, поток фотонов
ε	— пористость среды

- λ — постоянная распада, с^{-1}
- η — динамическая вязкость воздуха, $\text{Па}\cdot\text{с}$
- P_{Rn} — радоновый потенциал грунта, $\text{кБк}/\text{м}^3$
- ρ — плотность материала или грунта, $\text{кг}/\text{м}^3$

ГЛАВА 1

Радиоактивность и основы дозиметрии

1.1. Явление радиоактивности и основные дозиметрические характеристики

Все химические элементы образованы атомами — мельчайшими частицами, все еще сохраняющими свойства данного вещества. В свою очередь атом состоит из ядра и окружающих его электронов, причем положительный заряд ядра равен сумме отрицательных зарядов электронов на его орбитах, то есть в целом атом электрически нейтрален. Ядро также имеет внутреннюю структуру, оно строится из нуклонов: положительно заряженных протонов и не имеющих заряда нейтронов. Нейтроны и протоны примерно одинаковы по массе, тогда как масса электрона пренебрежимо мала по сравнению с массой нуклонов. Ядро определяет атомную массу элемента, тогда как количество и расположение электронов — его химические свойства.

Ядра атомов большинства известных химических элементов стабильны. Но наряду с ними существуют и элементы, атомные ядра которых самопроизвольно распадаются, в результате чего один элемент превращается в другой. Способные к спонтанному распаду элементы называют *радионуклидами*, а само явление ядерных превращений — *радиоактивностью*. В настоящее время под радиоактивностью понимают ядерные изменения, длительность которых находится в интервале от 10^{-12} с до 10^{20} лет [9; 63]. В естественном виде существует около 60 радионуклидов, которые возникли при первичном синтезе химических элементов, либо в процессе распада первичных радиоактивных ядер. Всего же на данный момент известно более 2 000 радионуклидов.

Радиоактивный распад сопровождается испусканием α - или β -частиц, а также сверхвысокочастотным электромагнитным γ -излучением. Его необходимым, но не всегда достаточным условием является энергетическая выгодность — масса исходного ядра

должна быть больше массы дочернего ядра и вылетающих при распаде частиц [35].

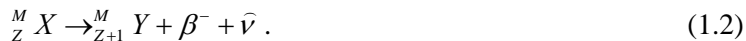
При *альфа-распаде* исходным ядром испускается α -частица (ядро атома гелия), а дочернее ядро образуется в основном или в возбужденном состоянии. Альфа-распад характерен для радионуклидов с массовым числом $M \geq 82$ за исключением небольшой группы редкоземельных металлов. При образовании дочернего ядра в основном энергетическом состоянии все испускаемые α -частицы имеют практически одинаковую энергию, если же ядро образуется в возбужденном состоянии, то α -частицы образуют дискретный энергетический спектр, а переход образовавшегося ядра в основное состояние сопровождается излучением γ -кванта. Процесс превращения ядер при α -распаде можно записать в следующем виде



где Z — зарядовое число.

Периоды полураспада α -излучателей находятся в пределах от $5,3 \cdot 10^{-8}$ с для протактиния ${}^{219}\text{Pa}$ до $8,3 \cdot 10^8$ лет для вольфрама ${}^{182}\text{W}$, а энергии испускаемых α -частиц лежат в интервале от 2 до 9 МэВ [35].

Бета-распад — процесс самопроизвольного ядерного превращения, при котором нейтрон переходит в протон (или наоборот) и испускается электрон. Массовое число дочернего ядра не меняется (ядро-изобар), а зарядовое уменьшается на единицу, в результате новый атом смещается в таблице Менделеева на одну позицию вправо. Процесс превращения ядер при β -распаде имеет вид



В процессе β -распада также излучается элементарная частица антинейтрино $\bar{\nu}$, причем энергия распада распределяется между электроном и антинейтрино случайным образом, в результате чего электроны имеют сплошной энергетический спектр. Электрон и нейтрино в ядре не существуют, они образуются в момент распада нуклона при его взаимодействии с внутриядерными силами.

Разновидностью β -распада является позитронный распад, при котором испускается позитрон e^+ и нейтрино ν , такой распад ха-

рактен для ядер с избытком протонов. Атомный номер дочернего ядра при β^+ -распаде уменьшается на единицу, а массовое число также остается неизменным. Формула позитронного распада



Минимальная энергия, необходимая для излучения электрона (позитрона), составляет 1,02 МэВ. Если энергия ядерного превращения меньше, то переход в дочернее ядро может произойти путем захвата материнским ядром электрона с внутренней оболочки (К-захват). При этом ядерное превращение также описывается формулой (1.3).

Выражения (1.1) — (1.3) называют *правилами смещения* радиоактивного элемента в таблице Менделеева. С их использованием можно определить начальный радиоактивный элемент и конечный (стабильный) продукт распада. Последовательность радионуклидов, каждый из которых самопроизвольно превращается в следующий, вплоть до образования стабильного элемента, называют *радиоактивным рядом*. Таких рядов всего четыре, в естественном состоянии на Земле встречаются ряды тория, урана и актиния (рис. 1.1, а–в), тогда как ряд, начинающийся с нептуния-237 ($4n+1$), уже полностью распался. Характеристики родоначальников радиоактивных семейств представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Радиоактивные ряды

Ряд	Массовое число M	Начальный изотоп	$T_{1/2}$, лет	Конечное ядро
Торий	$4n$	${}^{232}\text{Th}$	$1,4 \cdot 10^{10}$	${}^{208}\text{Pb}$
Нептуний	$4n + 1$	${}^{237}\text{Np}$	$2,2 \cdot 10^6$	${}^{209}\text{Pb}$
Уран	$4n + 2$	${}^{238}\text{U}$	$4,5 \cdot 10^9$	${}^{206}\text{Pb}$
Актиний	$4n + 3$	${}^{235}\text{U}$	$7,0 \cdot 10^8$	${}^{207}\text{Pb}$

Радиоактивный распад сопровождается непрерывным уменьшением числа ядер исходного радионуклида, причем число атомов, распавшихся за время dt , пропорционально их начальному количеству N

$$-dN = \lambda N dt , \quad (1.4)$$

где λ — постоянная распада, зависящая от свойств вещества, с^{-1} . Знак «минус» в левой части указывает на уменьшение количества радиоактивного вещества.

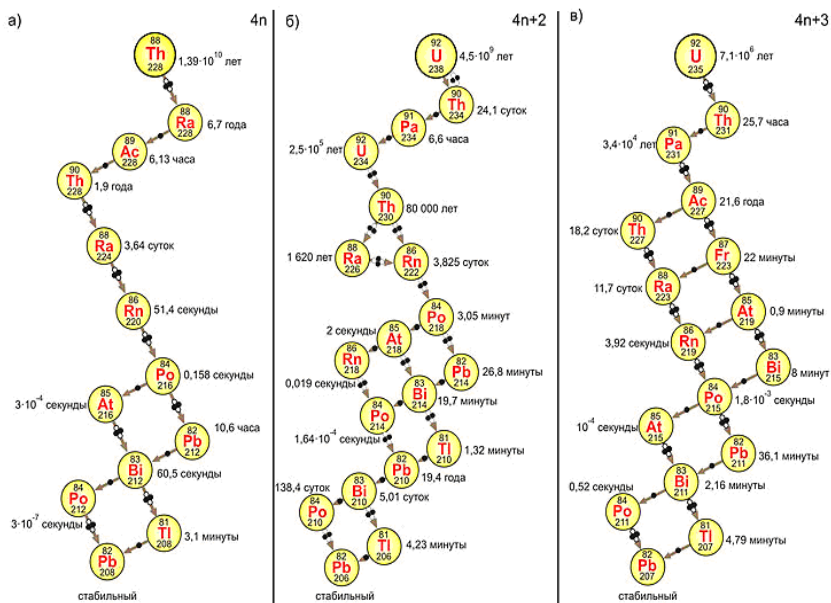


Рис. 1.1. Радиоактивные семейства: а — тория; б — урана-238; в — урана-235

Из решения дифференциального уравнения (1.4) получается закон радиоактивного распада

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (1.5)$$

Радиоактивность представляет собой статистический процесс, поскольку ядра одного и того же элемента распадаются за различные периоды времени. Как следует из (1.5), со временем число ядер радионуклида уменьшается, а потому снижается интенсивность радиоактивного распада.

Скорость радиоактивного распада характеризуется *периодом полураспада* $T_{1/2}$ — временем, в течение которого исходное число ядер данного элемента уменьшается в два раза. Период полураспада связан с постоянной распада соотношением

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda},$$

его величина постоянная для каждого радионуклида и не зависит от внешних условий. Численные значения периодов полураспада различных радионуклидов составляют от долей секунды до многих миллиардов лет.

Состояние статистического равновесия между активностью материнского нуклида и активностью каждого из его дочерних продуктов называют *радиоактивным равновесием*. Для его наступления достаточно 8–10 периодов полураспада более короткоживущего нуклида. При равновесии в единицу времени распадается столько ядер данного нуклида, сколько и образуется из материнского элемента. При радиоактивном равновесии выполняется условие

$$\lambda_m N_m = \lambda_d N_d, \quad (1.6)$$

где λ_m и N_m — постоянная распада и количество ядер материнского элемента, соответственно; λ_d и N_d — постоянная распада и количество ядер дочернего элемента, соответственно.

Соотношение (1.6) называется *вековым уравнением*, оно позволяет определить постоянную распада одного элемента по известной постоянной распада другого, что актуально для веществ, которые распадаются очень быстро или крайне медленно. Таким образом, постоянная распада есть вероятность распада данного ядра в единицу времени.

Для количественной оценки способности радиоактивных элементов к распаду введено понятие их *активности*, представляющей число распадов ядер радиоактивного элемента dN за время dt

$$A(t) = \frac{dN}{dt} = \lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t}. \quad (1.7)$$

Из (1.7) можно найти активность вещества в любой момент времени.

Первоначально за единицу активности была принята активность 1 г радия, получившая название *кюри* (Ки). Единицей активности радионуклида в системе СИ установлен *беккерель* (Бк), один

беккерель соответствует одному акту распада радиоактивного вещества в секунду. Поскольку 1 г радия дает $3,7 \cdot 10^{10}$ расп/с, то связь системной и внесистемной единиц

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}, 1 \text{ Бк} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Ки}.$$

Также используются понятия *удельной* (Бк/кг) и *объемной* (Бк/м³) *активности*, представляющие отношение активности радионуклида к массе или объему содержащего его вещества.

Возникающие в процессе радиоактивного распада излучения (α , β и γ) взаимодействуют с веществом, их энергия практически мгновенно передается атомам облучаемого вещества, вызывая их возбуждение. При определенной величине поглощенной энергии ранее связанные с атомным ядром электроны становятся свободными, а атомы вещества — положительно заряженными ионами. Процесс образования заряженных частиц в веществе называют ионизацией, а вызывающие этот процесс излучения — *ионизирующими*. Ионам и атомам вещества в возбужденном состоянии свойственна повышенная химическая реактивность, то есть способность вступать в такие реакции, которые невозможны в основном состоянии.

С точки зрения радиационной безопасности наиболее важной характеристикой ионизирующих излучений является их проникающая способность, которая прямо пропорциональна энергии излучения. Для защиты от излучений используют свинец, бетон, свинцовое стекло, воду и другие материалы.

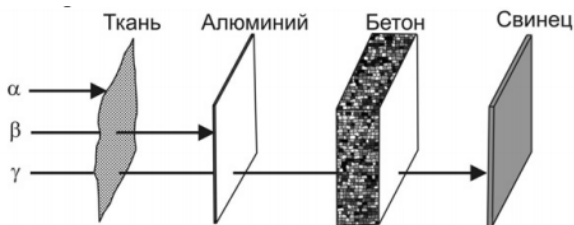


Рис. 1.2. Проникающая способность различных видов ионизирующих излучений

Альфа-частицы обладают большой кинетической энергией, их скорость при распаде составляет $(1,5 \div 2,0) \cdot 10^7$ м/с. Эта энергия

расходуется на ионизацию молекул вещества, каждая α -частица способна до остановки образовывать до 20 000 пар ионов. Поэтому α -излучение имеет наибольшую ионизирующую способность, но при этом и наименьшую проникающую способность. Пробег α -частиц не превышает 10 см в воздухе и нескольких микрон в мягких тканях человека, их полностью задерживает бумага или ткань (рис. 1.2). Как результат, α -излучение представляет опасность исключительно при внутреннем облучении.

Средняя скорость β -частиц в воздухе составляет $1,6 \cdot 10^8$ м/с, их максимальный пробег в воздухе достигает нескольких метров, а в биологической ткани не превышает 1 см. Поэтому β -излучение также несет угрозу только при внутреннем облучении человека, но ввиду малой массы электрона (позитрона) ионизирующая способность β -излучения намного меньше, чем у α -излучения.

Гамма-излучение имеет наибольшую проникающую способность из-за отсутствия электрического заряда и малой длины волны (40...0,1 нм), оно способно проникать через слой свинца толщиной до 5 см, проходить насквозь тело человека. Самостоятельное γ -излучение не существует, оно сопровождает процессы α - и β -распадов, возбуждения и ионизации. Поглощение γ -квантов веществом происходит посредством фотоэффекта, комптоновского рассеяния или образования электронно-позитронных пар. В отличие от двух других видов, γ -излучение представляет опасность только при внешнем облучении человека, причем эта опасность возрастает с уменьшением длины волны γ -квантов.

Мерой воздействия ионизирующего излучения на вещество является *доза* — энергия излучения, поглощенная облучаемым веществом. Процесс поглощения энергии в веществе достаточно сложен, поэтому для описания физических, химических и биологических эффектов от действия ионизирующего излучения одновременно используется несколько дозовых величин.

Поглощенной дозой D считается энергия излучения dE , поглощенная единицей массы вещества dm

$$D = \frac{dE}{dm}. \quad (1.8)$$

Единица измерения поглощенной дозы — *грей* (Гр), 1 Гр соответствует поглощению в 1 кг облучаемого вещества

1 Дж энергии. Дозу, поглощенную в веществе в единицу времени, называют *мощностью поглощенной дозы* P_D

$$P_D = \frac{D}{t}. \quad (1.9)$$

Она измеряется в греях за секунду (Гр/с).

Поглощенная доза характеризует не само излучение, а его воздействие на среду [28]. Она не может быть использована для оценки биологического эффекта от облучения, так как разные виды ионизирующих излучений при одинаковой энергии имеют разное поражающее действие. Для учета различной ионизирующей способности разных видов ионизирующих излучений введено понятие *эквивалентной дозы* H

$$H = D \cdot W, \quad (1.10)$$

где W — коэффициенты качества излучения, значения которых для различных видов ионизирующих излучений представлены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Коэффициенты качества ионизирующих излучений

Виды излучения	W	Виды излучения	W
Рентгеновское излучение	1	Тяжелые ядра отдачи	20
Гамма-излучение	1	Альфа-излучение	20
Электроны и позитроны (β -излучение)	1	Протоны с энергией менее 10 МэВ	10
Нейтроны с энергией менее 20 кэВ	3	Нейтроны с энергией менее 0,1– 10 МэВ	10

Единица измерения эквивалентной дозы — *Зиверт* (Зв), ее мощность по аналогии с (1.8) определяется по формуле

$$P_H = \frac{H}{t}$$

и измеряется в зивертах за секунду (Зв/с). 1 Зиверт — достаточно большая величина, поэтому на практике используются его доли: милли- и микрозиверты (мЗв и мкЗв).

Природный радиационный фон на большей части территории РФ находится в пределах 0,10–0,25 мкЗв/ч, а годовая эквивалентная доза облучения населения природными источниками излучения не должна превышать 5 мЗв [55].

Эквивалентная доза является основной величиной в радиационной защите, она позволяет количественно оценить биологический эффект от действия разных типов ионизирующих излучений. Однако она не учитывает разную чувствительность органов человека к их действию, поэтому для оценки последствий облучения человеческого организма в целом, с учетом восприимчивости различных органов к тем или иным видам излучений, введена *эффективная эквивалентная доза* — сумма произведений эквивалентных доз в отдельных органах и тканях на их коэффициент радиационного риска

$$E = \sum_{i=1}^n (H_i \cdot K_{pi}), \quad (1.11)$$

где K_{pi} — коэффициенты радиационного риска для отдельных органов, приведенные в табл. 1.3.

Эффективная эквивалентная доза позволяет определить суммарный риск от облучения разных участков тела при разных дозах и длительностях облучения. Она представляет собой характеристику ожидаемых негативных для человека последствий облучения, проявляющихся в патологических изменениях его органов и тканей, а также в эквивалентных им по значимости генетических отклонениях в потомстве.

Таблица 1.3

**Коэффициенты радиационного риска
для тканей и органов**

Ткань или орган	K_p	Ткань или орган	K_p
Половые железы	0,20	Мочевой пузырь, грудные железы, печень, пищевод, щитовидная железа, прочие органы	0,05
Красный костный мозг, кишечник, легкие, желудок	0,12	Кожа и поверхность костей	0,01

Необходимость оценки величины облучения больших групп людей (этнических или профессиональных) малыми дозами радиации потребовала введения *коллективной эффективной дозы* — суммы индивидуальных эффективных эквивалентных доз облучения данной когорты людей за определенный промежуток времени

$$E_p = \sum_{i=1}^N E_i, \quad (1.12)$$

где N — число лиц данной группы, чел.

Единицей измерения коллективной дозы является человеко-зиверт (чел.-Зв), ее величина растет с увеличением как индивидуальных доз, так и численности облученных. Считается, что на каждую тысячу чел.-Зв коллективной дозы приходится 60 случаев возникновения злокачественных образований [28]. Облучение в 1 чел.-Зв приводит к потенциальному ущербу, равному потере 1 чел.-года жизни облученного населения, при этом причиненный ущерб эквивалентен величине годового национального дохода на душу населения в стране.

По современным представлениям воздействие на людей ионизирующих излучений способно вызывать детерминированные (неизбежные) или стохастические (случайные) негативные эффекты, появление тех или иных из них зависит от целого ряда факторов: величины и продолжительности облучения, вида излучения, размеров облученной поверхности, индивидуальных особенностей организма и т. д.

Исторически первыми были изучены *детерминированные* эффекты от мощных кратковременных доз, наносящих острые лучевые поражения и вызывающих развитие в короткие сроки лучевой болезни. Затем было обнаружено, что при растянутом во времени облучении вероятность лучевого поражения и тяжесть последствий значительно снижается. Если же поглощенная доза менее 0,25 Зв (для γ -излучения), то не наступает изменений в состоянии здоровья, которые могут быть обнаружены современными медицинскими средствами. Эта доза считается порогом появления детерминированных эффектов от действия радиации.

К концу XX века было установлено, что малые мощности доз облучения (не более 1 мЗв/год), формируемые естественными ис-

точниками на протяжении длительного времени, с определенной вероятностью могут привести в отдаленном будущем к злокачественным новообразованиям различных органов и тканей, а также росту частоты и тяжести генетических отклонений. При таком облучении тяжесть радиационного ущерба не зависит от величины дозы, а сам процесс развития патологических явлений носит случайный характер. Подобные отрицательные эффекты от облучения в малых дозах называются *стохастическими* [45].

Для оценки стохастических эффектов Международной комиссией по радиологической защите принята *линейная беспороговая концепция* (рис. 1.3, а), согласно которой любое дополнительное облучение сверх природного радиационного фона вызывает пропорциональное увеличение риска возникновения злокачественных новообразований. Годовая доза облучения естественными радионуклидами (0,24 мЗв) рассчитана для пребывания на открытой местности 2 000 ч/год при мощности дозы 0,12 мкЗв/ч.

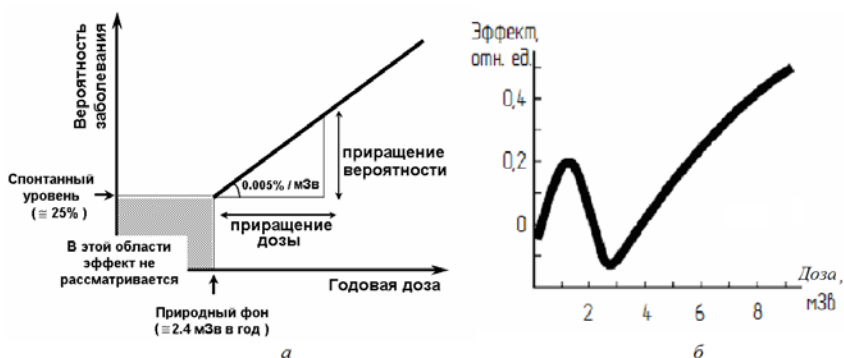


Рис. 1.3. Зависимость «доза-эффект»:
 а — беспороговая линейная, б — S-образная
 (отрицательные значения эффекта соответствуют гормезису)

Однако данная концепция не объясняет целый ряд результатов экспериментальных и эпидемиологических исследований. Так, ряд исследователей обосновывает существование порога проявления стохастических эффектов отсутствием увеличения частоты онкологических заболеваний на территориях с аномально высоким естественным радиационным фоном. Другие ученые указывают на S-образный вид кривой зависимости «доза-эффект» с двумя

противоположно направленными максимумами в области сверхмалых доз (рис. 1.3, б), соответствующими гиперрадиочувствительности (повышенному радиационному ущербу от ультрамалых доз) и гормезису (стимулирующему действию облучения на организм человека), за которыми наблюдается линейный участок. В [72] отмечается, что в диапазоне малых доз, создаваемых естественными источникам ионизирующего излучения, стохастические эффекты практически не зависят от мощности дозы, а определяются суммарной кумулятивной дозой.

Изучение закономерностей возникновения у населения злокачественных новообразований под воздействием негативных факторов окружающей среды является одним из наиболее важных направлений современной медицинской науки. Именно этими факторами обусловлено 9 из 10 диагностируемых случаев рака, из которых 10 % связывают с воздействием радиационных канцерогенов. Ионизирующие излучения являются одним из наиболее универсальных физических канцерогенов, их действие не только причиняет значительный социальный и экономический ущерб, но и приводит к ухудшению коллективного здоровья населения РФ. Поэтому обеспечение радиационной безопасности населения является важнейшей задачей, отвечающей концепции сохранения генофонда России.

1.2. Классификация источников облучения населения

Источники ионизирующего излучения классифицируют по целому ряду признаков в зависимости от основного предмета внимания. Такими признаками выступают природа излучения, его происхождение, расположение относительно организма человека, период полураспада, возможность регулирования дозы облучения и т. д.

По своей *природе* излучения, возникающие при радиоактивном распаде, делятся на электромагнитные (фотонные) и корпускулярные. Фотонное излучение с энергией до 50 кэВ ($\lambda > 2,5 \cdot 10^{-11}$ м) называется рентгеновским, а выше 50 кэВ — гамма-излучением. К корпускулярному ионизирующему излучению относятся любые частицы с ненулевой массой (альфа-, бета-излучение, нейтроны, ядра, нестабильные частицы), энергия которых превышает потенциал ионизации вещества (порядка 50 эВ).

По расположению относительно организма человека все источники ионизирующего излучения делят на внутренние и внешние. Внутренними источниками облучения являются радон и его короткоживущие дочерние продукты, попадающие в органы дыхания с воздухом и распадающиеся в них, а также радионуклиды, поступающие в организм с пищей (^3H , ^7Be , ^{14}C , ^{22}Na , ^{40}K , ^{87}Rb , ^{90}Sr и ^{137}Cs). К внешним источникам относится гамма-излучение независимо от его происхождения.

По происхождению различают искусственное, естественное и техногенно измененное естественное излучение. Между искусственной и естественной радиоактивностью нет разницы, в обоих случаях процессы радиоактивных превращений протекают по одинаковым законам.

К искусственным источникам ионизирующего излучения относят медицинское диагностическое оборудование, а также искусственные радионуклиды (^3H , ^{14}C , ^{90}Sr , ^{95}Zr , ^{106}Ru , ^{137}Cs , ^{131}I и ^{144}Se), попавшие в Биосферу в результате работы предприятий ядерно-топливного цикла или испытаний ядерного оружия в атмосфере [84]. Доза от испытаний ядерного оружия уже сформирована, на данный момент продолжается выпадение вместе с осадками из стратосферы долгоживущих ^{90}Sr и ^{137}Cs , для которого характерно широтное распределение с максимумом на $50\text{--}60^\circ$ северной широты, где проводилось большинство испытаний.

Естественными источниками ионизирующего излучения являются космическое излучение и γ -излучение радионуклидов почвы, совместно образующие естественный радиационный фон, причем на уровне моря вклад в дозу излучения грунта существенно выше. Также к этим источникам относят естественные радионуклиды, поступающие в организм человека с пищей и водой.

Техногенно измененный радиационный фон обусловлен вовлечением в жизнедеятельность человека радионуклидов, извлекаемых из Биосферы вместе с сырьевыми ресурсами. Он формируется естественными радионуклидами, содержащимися в строительных материалах, и радоном, который поступает в помещения нижнего этажа из грунтового основания и выделяется из ограждающих конструкций зданий.

Структура годовой дозы облучения населения изменяется по регионам РФ от 0,75 до 7,75 мЗв в зависимости от геофизических, климатических и других особенностей [61], однако ее структура

практически одинакова для всех без исключения регионов (табл. 1.4). При переходе от экспозиции к дозе облучения радон в табл. 1.4 использовался конверсионный множитель $11,9 \text{ нЗв}/(\text{Бк}\cdot\text{ч}/\text{м}^3)$, косвенно приведенный в стандарте безопасности, разработанном МАГАТЭ [137].

Деление на *контролируемые* и *неконтролируемые* источники характеризует их с точки зрения реальной возможности влиять на создаваемую ими дозу облучения. К контролируемым относят техногенно измененные естественные источники, так как облучение в помещениях может быть существенно снижено за счет использования строительных материалов с низким содержанием ЕРН и рационального проектирования заглубленной части здания. Медицинская доза также имеет тенденцию к снижению по мере совершенствования диагностического оборудования.

Таблица 1.4

**Структура годовой дозы облучения населения
в Российской Федерации**

Источники облучения	Мощность дозы облучения	
	<i>H</i> , мЗв/год	% годовой дозы
Искусственные:	0,45	7,9
1. Медицинская доза	0,40	7,0
2. Атомная энергетика и испытание ядерного оружия	не более 0,05	0,9
Естественные:	0,32	5,6
1. Космическое излучение (100 м над уровнем моря)	0,06	1,0
2. ЕРН в грунте (0,13 мкЗв/ч при 2 000 ч/год пребывания на открытой местности)	0,26	4,6
Техногенно измененные естественные:	4,94	86,5
1. ЕРН в стройматериалах (0,11 мкЗв/ч при 7 000 ч в год в зданиях)	0,77	13,5
2. Облучение радоном и его ДПР (50 Бк/м ³ при 7 000 ч/год в зданиях)	4,17	73,0
Суммарная доза	5,71	100 %

Как видно из табл. 1.4, большая часть годовой индивидуальной дозы облучения населения формируется в помещениях зданий. Природные радионуклиды содержатся во всех строительных материалах, изготовленных из природных материалов или продуктов их переработки. Гамма-излучение ограждающих конструкций сопровождает распад природных радионуклидов в материалах кон-

струкций, оно практически неизменно во времени и равномерно по объему помещения. В большинстве случаев гамма-фон помещения несколько ниже естественного радиационного фона (0,08–0,12 мкЗв/ч), то есть здания оказывают экранирующее действие по отношению к внешней радиации.

Содержание радионуклидов в материале характеризуется их средней по массе удельной эффективной активностью $A_{эфф}$

$$A_{эфф} = C_{Ra} + 1,3C_{Th} + 0,09C_K, \quad (1.13)$$

где C_{Ra} , C_{Th} и C_K — удельные активности радия-226, тория-232 и калия-40, соответственно, Бк/кг.

По величине удельной активности строительные материалы и сырье для их производства делятся на 4 класса [53]:

– I класс ($A_{эфф} < 370$ Бк/кг) — материалы, используемые в строящихся и реконструируемых жилых и общественных зданиях;

– II класс ($370 \leq A_{эфф} < 740$ Бк/кг) — материалы, используемые в дорожном строительстве в пределах населенных пунктов и зон перспективной застройки, а также при возведении производственных сооружений;

– III класс ($740 \leq A_{эфф} < 1\,500$ Бк/кг) — материалы, используемые в дорожном строительстве за пределами населенных пунктов;

– IV класс ($1\,500 \leq A_{эфф} < 4\,000$ Бк/кг) — вопрос об использовании материалов решается в каждом случае отдельно по согласованию с федеральным органом Госсанэпиднадзора. При $A_{эфф} > 4\,000$ Бк/кг материалы не должны использоваться в строительстве.

Согласно действующим Нормам радиационной безопасности 99/2009 [53] эффективная доза техногенного облучения от природных источников в производственных условиях не должна превышать 5 мЗв/год, а средняя за любые 5 лет эффективная доза техногенного облучения населения в непромышленных условиях не должна превышать 1 мЗв/год. Допустимое значение эффективной дозы, обусловленной суммарным воздействием природных источников в непромышленных условиях, для населения не устанавливается. Однако предусматривается снижение облучения населения до технологически обоснованного минимального уровня.

Итак, от 50 до 70 % годовой дозы облучения населения формируется в помещениях от радона и его дочерних продуктов

распада (ДПР), но при этом радоновая составляющая годовой дозы облучения населения является регулируемой, ее вклад может быть существенно снижен за счет реализации соответствующих технологий строительства. Однако эффективная стратегия защиты от радона может быть реализована только на основании знаний о свойствах радона, источниках и механизмах его поступления в воздух помещений.

1.3. Основные изотопы радона и нормирование радонового облучения

Радон — химический элемент нулевой группы периодической системы, благородный радиоактивный одноатомный газ без цвета и запаха. Это один из наименее распространенных элементов на Земле, он образуется во всех трех радиоактивных семействах и не имеет стабильных изотопов. Известно 19 изотопов радона с массовыми номерами от 204 до 224, естественными являются ^{222}Rn (радон), ^{220}Rn (торон) и ^{219}Rn (актинон), а также короткоживущий ^{218}Rn , входящий в побочную ветвь семейства урана с пренебрежимо малым коэффициентом ветвления $2 \cdot 10^{-7}$ [73]. Радон получил название по своему наиболее долгоживущему изотопу ^{222}Rn , образующемуся при α -распаде радия-226. Но обычно в литературе под радоном понимают все три естественных изотопа. Ряды распада природных изотопов радона в сокращенном виде показаны на рис. 1.4.

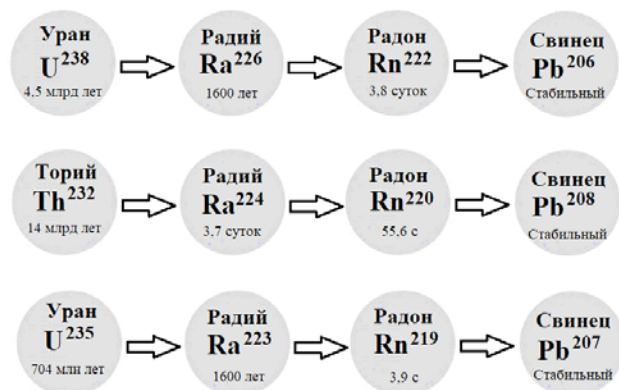


Рис. 1.4. Схема образования и распада изотопов радона

В природе наиболее распространен основной изотоп ^{222}Rn , хотя его суммарная масса в атмосфере и твердой оболочке Земли не превышает нескольких килограммов. Период полураспада радона-222 достаточно велик (3,82 суток), благодаря чему он успевает мигрировать в геологической среде на значительные расстояния, достигая подземной оболочки зданий и, преодолевая ее, накапливаться в воздухе помещений нижнего этажа. Период полураспада двух остальных естественных изотопов намного меньше (у торона 55,6 с, у актинона — 3,9 с), вследствие чего они не способны мигрировать из грунта в воздух помещений, а потому не несут сколь-либо существенного вклада в бытовое облучение населения.

Уран и торий повсеместно присутствуют в породообразующих материалах земной коры. Среднее массовое содержание урана в земной коре составляет около $2,5 \cdot 10^{-4} \%$, а тория в несколько раз больше. По данным Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ), среднее содержание урана в организме человека составляет около $9 \cdot 10^{-8}$ г. В микроскопическом количестве он, как и ряд других природных радионуклидов, необходим для нормальной жизнедеятельности животных и растений. Поскольку периоды полураспада изотопов урана исчисляются миллиардами лет, процессы образования материнского радия и затем радона можно считать постоянными.

Содержание урана и тория, являющихся родоначальниками изотопов радона, в определенной мере характеризуют способность материала к выделению этих изотопов. Распределение образующих радон элементов в грунтах зависит от многих факторов. В частности, от характера развития горных пород на данной территории в определенных геологических периодах, геоморфологии, прошлой и текущей тектонической деятельности и др. Наиболее достоверную информацию об их содержании на конкретной территории получают на основе результатов радиогеологических исследований.

Как уже было показано выше, радон формирует не менее 50 % годовой дозы облучения от всех источников ионизирующего излучения, а на потенциально радоноопасных территориях РФ (Республики Алтай и Тыва, Забайкальский край, Еврейский автономный округ, регион Кавказских Минеральных вод и др.) его вклад может превышать 80 % [30; 61; 73]. Однако для современного общества характерно недопонимание радоновой проблемы, среди населения укоренилось убеждение, что угрозу здоровью могут

представлять только радиационные аварии и утечки радиоактивных отходов.

Хотя принято говорить об облучении радоном, но практически вся доза облучения в зданиях формируется не радоном, а его короткоживущими дочерними продуктами распада. К ДПР радона относятся короткоживущие и долгоживущие радионуклиды, располагающиеся во всех радиоактивных семействах после изотопов радона. На рис. 1.5 показаны ДПР радона-222 и радона-220 (торона), из-за крайне малого периода полураспада радон-219 (актинон) и его ДПР не представляют сколь либо значимого научного и практического интереса.

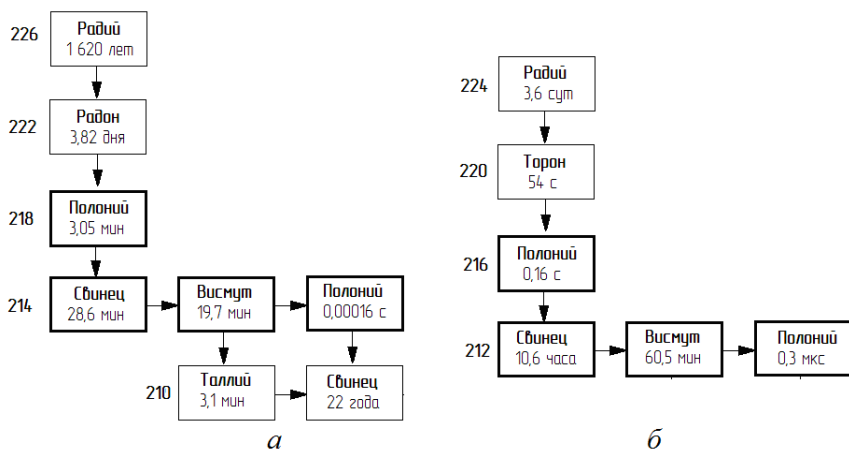


Рис. 1.5. Дочерние продукты распада радона-222

Первый дочерний продукт ^{218}Po (как и ^{216}Po у торона) образуется в виде многозарядного положительного иона [175]. В процессе термализации атомы полония уменьшают свой заряд до однократного или нейтрализуются за время порядка 1–3 с [62]. Эти атомы взаимодействуют с примесями воздуха и парами воды, образуя кластеры размером от 0,5 до 3 нм или присоединяясь к аэрозольным частицам [5]. Значительная часть кластеров и аэрозолей осаждается в дыхательных путях легких и, не успевая вывестись из-за малого периода полураспада $T_{1/2}$, формирует дозу облучения легочных тканей, основная часть которой воспринимается клетками в бронхиальном и бронхиолярном отделах легких, тогда как доза, приходящаяся на альвеолярный отдел, значительно ниже [162; 203].

В результате всего 2 % бытового облучения приходится на распад в органах дыхания достаточно долгоживущего радона, остальную дозу человек получает от его продуктов распада. В отличие от газообразного радона, его ДПР являются тяжелыми металлами, испускающими при распаде мощное α -излучение. Наибольший ущерб организму человека причиняют наиболее короткоживущие ДПР основного изотопа ^{222}Rn — полоний-218, свинец-214 и висмут-214 (рис. 5, а), на их долю приходится 90 % дозы внутреннего облучения. Торон поступает в воздух помещений только из материалов ограждающих конструкций, вклад его короткоживущих ДПР (рис. 5, б) составляет около 8 % дозы и практически полностью обусловлен распадом ^{216}Po .

Содержание радона в воздухе помещений характеризуется *эквивалентной равновесной объемной активностью* (ЭРОА) дочерних продуктов распада — объемной активностью газообразного радона в равновесии с его короткоживущими ДПР, имеющей такую же удельную потенциальную энергию альфа-излучения, как и существующая неравновесная смесь. Во внимание принимаются только ЭРОА ДПР радона и торона, определяемые по формулам

$$\text{ЭРОА}_{Rn} = 0,105 \cdot RaA + 0,515 \cdot RaB + 0,380 \cdot RaC, \quad (1.14)$$

$$\text{ЭРОА}_{Tn} = 0,913 \cdot ThB + 0,087 \cdot ThC. \quad (1.15)$$

Суммарная активность всех изотопов радона в воздухе помещения находят по формуле

$$\text{ЭРОА} = \text{ЭРОА}_{Rn} + 4,6 \cdot \text{ЭРОА}_{Tn}. \quad (1.16)$$

Единицей ЭРОА является беккерель на метр кубический ($\text{Бк}/\text{м}^3$) — активность, при которой за 1 с в 1 м^3 происходит один акт распада радона. Ввиду незначительного вклада торона в общее поступление радона в воздух помещения вторым слагаемым в (1.16) зачастую пренебрегают.

В закрытом помещении с момента поступления в него радона происходит накопление его короткоживущих ДПР до момента установления *радиоактивного равновесия*. В цепочке короткоживущих ДПР радиоактивное равновесие с радоном-222 устанавливается по истечении примерно трех часов. В случае вентиляции

помещения часть поступившего в него радона и образовавшихся дочерних продуктов удаляется, не успев достичь состояния радиоактивного равновесия. Величина ЭРОА служит мерой текущего значения суммарной активности неравновесной смеси ДПР во внутреннем воздухе, с объемной активностью она связана соотношением

$$\text{ЭРОА} = \text{ОА} \cdot F, \quad (1.17)$$

где ОА — объемная активность (концентрация) радона в воздухе помещения, Бк/м^3 ; F — коэффициент сдвига радиоактивного равновесия между радоном и смесью его короткоживущих ДПР.

Величина коэффициента F зависит от большого числа факторов, определяющих скорость удаления дочерних продуктов радона из внутреннего воздуха, зависимость коэффициента сдвига от кратности воздухообмена экспериментально получена И. В. Ярмошенко и др. в [89]. Если предположить, что коэффициент сдвига определяется только условиями воздухообмена в помещении, то для его численной оценки можно использовать полином 5-й степени

$$F = -0,001n^5 + 0,0158n^4 - 0,1025n^3 + 0,3491n^2 - 0,7093n + 0,9784,$$

где n — кратность воздухообмена в помещении, час^{-1} .

Однако удаление продуктов распада радона происходит не только вследствие вентиляции помещения, но и при их осаждении на поверхностях ограждающих конструкций, мебели, одежде людей и т. п. В связи с высокой вариабельностью этих факторов точное значение величины F чаще всего расчету не поддается и обычно определяется экспериментально при одновременном измерении ОА и ЭРОА радона в помещении. Если же определить F инструментально не представляется возможным, его принимают равным 0,4 согласно Рекомендациям МКРЗ [138]. В условиях равновесия между радоном и его ДПР их объемные активности равны между собой ($F = 1$), но в реальных условиях эксплуатации зданий наблюдается сдвиг равновесия и F принимает значения в пределах от 0,2 до 0,8 [41].

На основе результатов радиационно-медицинских исследований установлены корреляционные связи между параметрами радона в воздушной среде помещений, временем пребывания в ней

человека и величинами формируемых при этом доз облучения. Согласно опубликованным Научным комитетом ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН) данным 1 час пребывания человека в среде с ЭРОА радона 1 Бк/м^3 ведет к формированию эффективной дозы облучения, равной $11,9 \text{ нЗв}$. То есть ежедневное на протяжении года 8-часовое пребывание на рабочем месте с ЭРОА радона, равной 50 Бк/м^3 приведет к получению годовой дозы в $1,74 \text{ мЗв}$, что в 1,74 раза превышает нормированное усредненное за 5 лет предельное допустимое значение дозы облучения населения от техногенных источников радиации.

Значение ЭРОА радона в воздухе помещения с установленной вероятностью определяет возможность нанесения ущерба здоровью человека вследствие облучения и служит критерием радоноопасности внутренней воздушной среды здания. В Нормах радиационной безопасности РФ установлено предельное допустимое среднегодовое значение ЭРОА радона в воздухе жилых и общественных зданий [53]:

- 100 Бк/м^3 в строящихся и реконструируемых зданиях, а также зданиях, строительство которых осуществлялось после 1991 г.;

- 200 Бк/м^3 в эксплуатируемых зданиях, построенных до 1991 г.

В большинстве стран мира, в связи со сложностью определения коэффициента сдвига радиоактивного равновесия в обычных условиях, вместо ЭРОА радона нормирована предельная допустимая среднегодовая величина объемной активности ОА радона. В табл. 1.5 представлены нормативы ОА в воздухе жилых зданий за рубежом.

Использование каждой из количественных характеристик содержания радона в воздухе помещений (ЭРОА и ОА) имеет свои преимущества и недостатки. ЭРОА радона позволяет перейти к величине эффективной дозы облучения человека без использования коэффициента сдвига равновесия между радоном и его ДПР, но ее среднегодовое значение не может быть измерено напрямую, в результате чего возникает неопределенность, связанная с сезонными вариациями уровней радона. В то же время ОА измеряется непосредственно, но для перехода к дозе облучения необходимо использовать целый ряд переменных или недостаточно точно определенных коэффициентов. Использование ЭРОА в РФ в качестве нормируемой величины создает определенные трудности при работе с международными организациями [88].

Таблица 1.5

**Нормы объемной активности радона ОА
в воздухе помещений**

Страна	Существующие здания	Строящиеся здания
Швеция	100	
Финляндия	400	100
США	150	
Канада	400	
Бельгия	300	
Германия	200	
Хорватия	68	
Великобритания	200	50
Украина*	100	50
Республика Беларусь*	200	100

*В единицах ЭРОА

Кроме того, значения ЭРОА (или ОА) в табл. 1.5 представляют собой уровни вмешательства, устанавливающие четкую границу между безопасным и опасным воздействием ДПР радона. Но это противоречит принятой на данный момент беспороговой линейной концепции, согласно которой любое облучение потенциально опасно. Заменой уровням вмешательства может стать введение некоего референтного уровня — концентрации радона в воздухе помещений, превышение которой допускать неприемлемо, а ниже которой следует проводить оптимизацию противорадной защиты. Рекомендациями МКРЗ предложено установить национальные референтные уровни ОА радона не выше 300 Бк/м³ [200], на территории РФ может действовать несколько референтных уровней (для регионов с существенно различными геофизическими характеристиками), определенных в ходе выборочного национального радонового обследования.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru