

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ АРХИТЕКТУРЫ
И СТРОИТЕЛЬНЫХ НАУК (РААСН)
Научно-исследовательский институт Строительной физики РААСН

Л. А. Гулабянц

А. В. Калайдо

ПРОТИВОРАДОНОВАЯ ЗАЩИТА ЖИЛЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ

Монография

Под редакцией
члена-корреспондента РААСН, д.т.н.
И. Л. Шубина



DirectMEDIA

**Москва
Берлин
2020**

УДК 624.01
ББК 38.300.69
Г94

Рецензенты:

Иванов Николай Игоревич — д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Экология и производственная безопасность «Балтийского государственного технического университета «Военмех им. Д. Ф. Устинова» (г. Санкт-Петербург);

Король Елена Анатольевна — член корреспондент РААСН, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой Жилищно-коммунального комплекса НИУ МГСУ (г. Москва);

Леднев Владимир Иванович — д.т.н., профессор, профессор кафедры «Городское строительство и автомобильные дороги» Тамбовского государственного технического университета (г. Тамбов)

Гулабянц, Л. А.

Г94 Противорадоновая защита жилых и общественных зданий : монография / **Л. А. Гулабянц**, А. В. Калайдо, под ред. И. Л. Шубина — Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2020. — 236 с.

ISBN 978-5-4499-1619-8

Монография посвящена относительно новому направлению в строительной физике — радоновой безопасности зданий. В ней изложены физические основы радиоактивности и дозиметрии, проанализировано текущее состояние радоновой проблемы в России и за рубежом, представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований факторов формирования радоновой обстановки в здании. На основании диффузионной модели переноса радона в грунте и подземных ограждающих конструкциях предложен простой и эффективный инженерный метод обеспечения требуемых радонозащитных характеристик зданий. Также в монографии представлен обширный обзор современных технологий снижения поступления радона в здания.

Монография предназначена для специалистов в области радиационной безопасности строительства и радиоэкологии, при этом она будет интересна широкому кругу лиц, интересующихся аспектами воздействия на человека ионизирующих излучений. Представленный в ней материал может быть использован при проектировании противорадоновой защиты строящихся и реконструируемых зданий, а также при разработке мероприятий, направленных на нормализацию радоновой обстановки в эксплуатируемых и подлежащих капитальному ремонту зданиях.

УДК 624.01
ББК 38.300.69

SBN 978-5-4499-1619-8

© **Гулабянц Л. А.**, Калайдо А. В., текст, 2020
© Издательство «Директ-Медиа», оформление, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ANNOTATION.....	11
INTRODUCTION.....	12
ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	17
ГЛАВА 1. Радиоактивность и основы дозиметрии.....	20
1.1. Явление радиоактивности и основные дозиметрические характеристики.....	20
1.2. Классификация источников облучения населения.....	31
1.3. Основные изотопы радона и нормирование радонового облучения.....	35
1.4. Биологические эффекты от облучения радоном и его дочерними продуктами распада.....	42
1.5. Методы и средства измерения уровней радона в воздухе помещений.....	46
ГЛАВА 2. Современное состояние радоновой проблемы в Российской Федерации и за рубежом.....	56
2.1. Радоновые исследования в зарубежных странах.....	56
2.2. Исследования уровней радона в зданиях на территории Российской Федерации и постсоветских государств.....	76
ГЛАВА 3. Исследование закономерностей переноса радона в пористой среде.....	93
3.1. Критерии и признаки радоноопасности.....	93
3.2. Общие закономерности переноса радона в пористой среде.....	95

3.3. Плотность потока радона как критерий радоноопасности территорий застройки	101
3.4. Экспериментальное определение параметров диффузионного переноса в пористой среде	121
3.5. Экспериментальное исследование закономерностей поступления радона в здания равнинных территорий	127
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.....	151
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	177
5.4.2. Активные технологии защиты зданий от радона.....	186
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	192
ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	195
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	202
СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ГУЛАБЯНЦА ЛОРЕНА АРАМОВИЧА	218
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	222
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	231

*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) радон 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 Бк/м³) 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 presentation 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
- $D_{эkv}$ — «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, Бк/(м ² ·с)
R	— сопротивление радонопроницанию слоя материала, с/м
S	— площадь пола, м ²
t	— время, с
T	— температура, °С и К
$T_{1/2}$	— период полураспада радионуклида, с
V	— объем помещения, м ³
v	— скорость конвективного потока, м/с
W	— коэффициент качества излучения
W_s	— активность радона в слое материала или грунта, Бк/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 $\hat{\nu}$, 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 характерен 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.

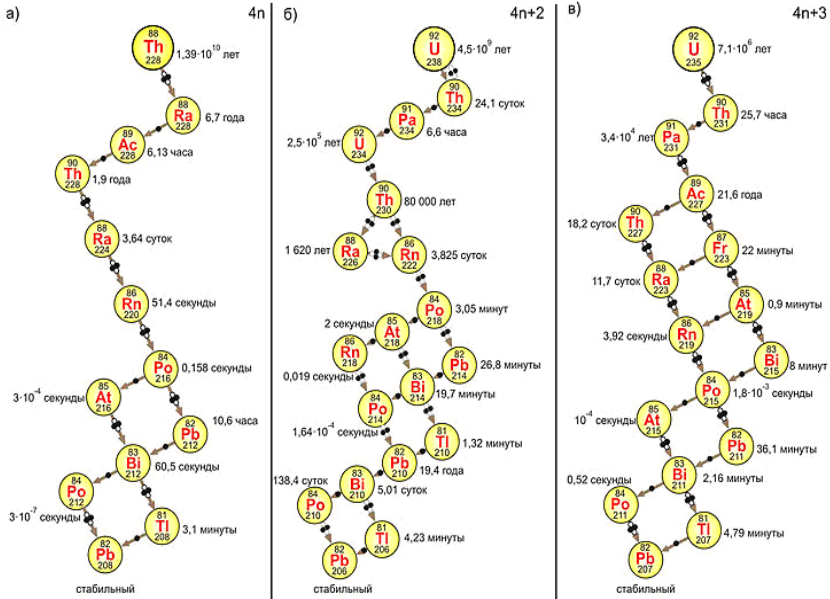


Рисунок 1.1 — Радиоактивные семейства: а — тория; б — урана-238; в — урана-235

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.

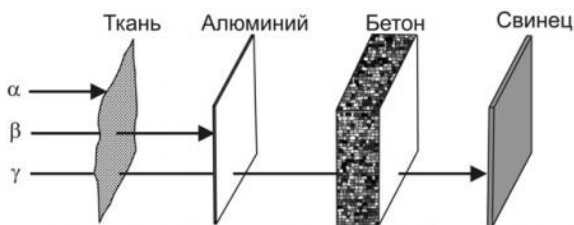


Рисунок 1.2 — Проникающая способность различных видов ионизирующих излучений

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

источниками 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.

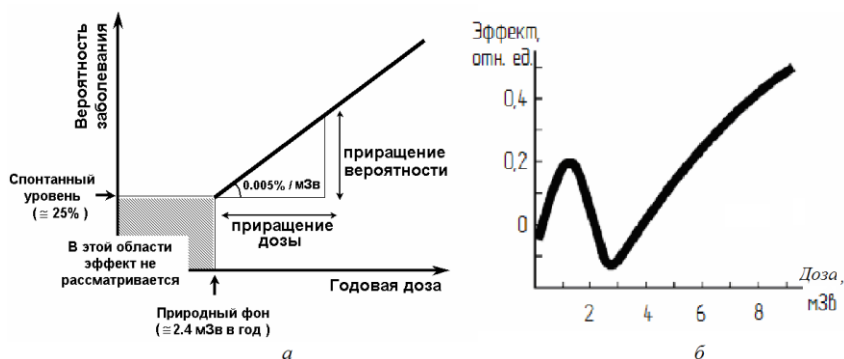


Рисунок 1.3 — Зависимость «доза-эффект»: а — беспороговая линейная, б — S-образная (отрицательные значения эффекта соответствуют гормезису)

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 радонном 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>Н, мЗв/год</i>	<i>% годовой дозы</i>
<i>Искусственные:</i>	<i>0,45</i>	<i>7,9</i>
1. Медицинская доза	0,40	7,0
2. Атомная энергетика и испытание ядерного оружия	не более 0,05	0,9
<i>Естественные:</i>	<i>0,32</i>	<i>5,6</i>
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
<i>Техногенно измененные естественные:</i>	<i>4,94</i>	<i>86,5</i>
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

конструкций, 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 , образуемому при α -распаде радия-226. Но обычно в литературе под радонам понимают все три естественных изотопа. Ряды распада природных изотопов радона в сокращенном виде показаны на рис. 1.4.

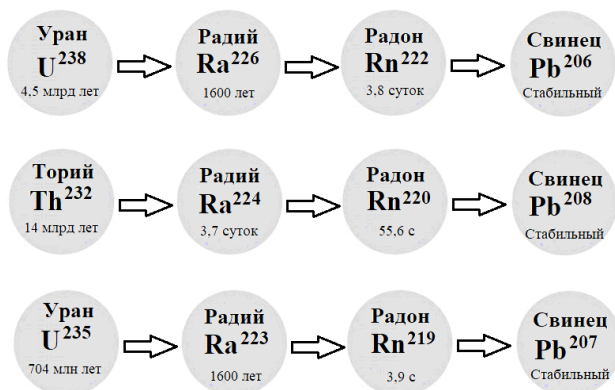


Рисунок 1.4 — Схема образования и распада изотопов радона

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, достигать 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 сколько-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.

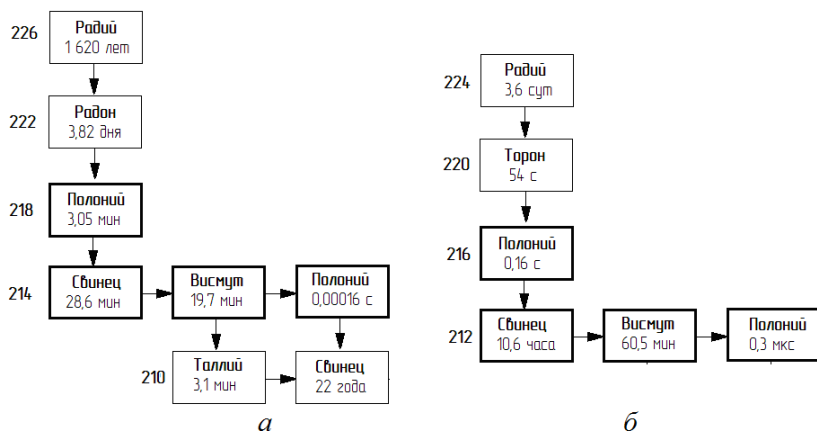


Рисунок 1.5 — Дочерние продукты распада радона-222

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

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

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

Суммарная активность всех изотопов радона в воздухе помещения находят по формуле

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

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

$$ЭРОА = ОА \cdot F, \quad (1.17)$$

где $ОА$ — объемная активность (концентрация) радона в воздухе помещения, Бк/м³; 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 противорадиационной защиты. Рекомендациями МКРЗ предложено установить национальные референтные уровни ОА радона не выше 300 Бк/м^3 [200], на территории РФ может действовать несколько референтных уровней (для регионов с существенно различными геофизическими характеристиками), определенных в ходе выборочного национального радонового обследования.

1.4. Биологические эффекты от облучения радоном и его дочерними продуктами распада

Первое упоминание об опасности облучения радоном относится к середине XVII века, когда в областях Богемия и Шниберг отмечалась крайне высокая смертность шахтеров, добывавших серебро. Тогда это объяснялось мезой горных духов за человеческое вторжение и лишь в начале XX века стало известно, что наряду с цветными металлами руды шахт были богаты ураном, в результате чего концентрация радона в них была крайне высока.

На протяжении большей части XX века проблема повышенного облучения радоном считалась актуальной только для шахтеров урановых рудников. Первой страной, оценившей опасность бытового радона для населения, стала Швеция. Расширение застройки на территории, образованные грунтами с повышенным содержанием радия, совпало по времени с ужесточением требований к энергоэффективности зданий. Политика энергосбережения привела к резкому снижению воздухообмена в помещениях, в результате чего концентрация радона в них стала соизмерима с его концентрацией в урановых рудниках.

Облучение радоном и его продуктами распада в закрытых помещениях относится к области малых доз. Малыми мощностями эквивалентных доз (МЭД) считаются мощности до 100 мЗв/год, их область можно условно разделить на три интервала: ультрамалые МЭД — до 2 мЗв/год; сверхмалые МЭД — до 10 мЗв/год и малые МЭД — до 20 мЗв/год.

При одних обстоятельствах облучение радоном может быть полезным, при других наносить значительный вред здоровью человека. Величина поглощенной дозы и органы, подвергающиеся облучению, являются теми принципиальными различиями, которые отличают лечебное воздействие радона в процессе приема бальнеологических процедур от негативного воздействия загрязненного радона воздуха, вдыхаемого в повседневной жизни.

В определенном диапазоне малых доз имеет место *гормезис* — эффект стимулирующего действия ионизирующего излучения на живой организм. Гормезис наблюдается при дозах, на два порядка меньше полуретальных, именно ним объясняется эффективность радонотерапии — лечения целого ряда заболеваний с помощью радоновых ванн, аппликаторов, употребления воды

с высоким содержанием радона. В процессе лечения жестко контролируются дозы, получаемые пациентами, а облучению по большей части подвергается кожа человека.

Радон хорошо растворяется в воде и содержится в больших количествах в водах некоторых природных подземных источников, ряд из них с давних времен приобрел репутацию целебных. Радоновая терапия основана на том, что содержащийся в воде радон легко проникает через кожный покров, растворяется в крови и лимфе и достаточно быстро распределяется внутри человеческого организма. Его насыщение радоном наступает примерно через час после погружения в радоновую ванну. Альфа-излучение радона и его короткоживущих ДПР создает высокую плотность ионизации молекул внутренних тканей и органов пациента, что вызывает раздражение нервных рецепторов и мобилизацию защитных функций организма. В результате активизируются обменные процессы, улучшается деятельность желез, усиливается регенерация клеток. Положительные результаты строго ограниченного по времени приема радоновых ванн с целью излечения ряда заболеваний в настоящее время не вызывают сомнений.

Принципиально иной механизм действия радона на организм человека имеет место при облучении в зданиях. Присутствие радона в воздухе помещений всегда указывает и на одновременное присутствие его ДПР. Сам по себе радон химически инертен, но его ионизированные ДПР (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi и ^{214}Po) сорбируются пылью и влагой, образуя альфа-радиоактивные аэрозоли. В отличие от чистого радона, свободно выводящегося из легких, его дочерние продукты распада задерживаются на всем протяжении дыхательного тракта. Доля осажденных в органах дыхания радиоактивных элементов определяется их размерами, периодом полураспада, склонностью элементов к гидролизу и т. д. Наиболее опасны аэрозоли субмикронных размеров, которые проникают в клетки бронхов и альвеолярные отделы легких, откуда они практически не выводятся. Так как пробег α -частиц в легочных тканях весьма мал, их энергия целиком поглощается вблизи места осаждения радионуклида.

Распад осевших в дыхательных органах дочерних продуктов радона обуславливает внутреннее облучение этих органов. Порядка 70 % поражающего действия радона и его ДПР приходится на дыхательные органы, небольшие дозы могут быть получены красным

костным мозгом и другими системными органами [149]. ДПР радона являются канцерогенным фактором, но кроме рака легкого других онкологических заболеваний не выявлено [119; 167]. На основании исследований Международного агентства по изучению рака радон помещен в первую группу человеческих канцерогенов [140; 141]. Среди разновидностей рака легкого, вызываемых радоновым облучением, чаще других диагностируются аденокарцинома, чешуевидная карцинома, саркома лимфатических узлов. Не исключается возможность отдаленных генетических последствий радонового облучения, но другие эффекты радона на порядок менее вероятны, чем рак легкого.

В процессе внутреннего облучения следует выделить два вида действия ДПР радона на органы дыхания человека:

1. *Прямое действие* — действие α -излучения непосредственно на молекулы органических структур, в результате чего образуются несвойственные живым организмам высокоактивные радикалы, присутствие которых в дальнейшем приводит к нарушению биохимических процессов. Например, при действии на аминокислоты происходит отрыв аминогруппы с образованием аммиака и формальдегида и разрывы пептидных связей, а при воздействии на белки и ферменты их денатурация (потеря структуры). Облучение липидов, углеводов и других органических молекул нарушает их обычную структуру и приводит к образованию свободных радикалов. Все это сопровождается нарушением физико-химических процессов, изменяет вязкость и другие физические характеристики биологических растворов, что сопровождается изменением структуры поверхности клетки и проницаемости мембран. Считается, что не вся клетка чувствительна к облучению, в ней имеется чувствительный участок — «мишень», воспринимающая действие ионизирующего излучения. Особо восприимчивы к облучению хромосомы ядер и цитоплазма.

2. *Непрямое действие* облучения радоном состоит в радиоллизе воды. Вода составляет около 80 % массы всех органов и тканей человеческого организма, при ее ионизации образуются радикалы, обладающие как окислительными, так и восстановительными свойствами. Наибольшее значение из них имеют атомарный водород (H), гидроксид (HO₂), перекись водорода (H₂O₂).

Свободные окисляющие радикалы вступают в реакцию с ферментами, содержащими сульфгидрильные группы (SH), которые

превращаются в неактивные дисульфидные соединения ($S = S$). В результате этих реакций и превращений нарушается каталитическая активность важных ферментных систем, регулирующих биохимические процессы в организме. Количество ДНК и РНК в ядрах клеток резко снижается, нарушается процесс их обновления. Изменения биохимизма ядер при этом выражаются в виде различных нарушений структуры хромосом, а следовательно, и всей генетической системы. В результате нарушения обменных процессов в организме накапливаются чуждые токсические аминокислоты, что усиливает биологическое действие ионизирующего излучения и способствует интоксикации организма.

На данный момент облучение радоном и его ДПР официально признано вторым по тяжести фактором (после курения), приводящим к возникновению рака легкого [167]. В Великобритании ежегодно погибают 2 500 человек от рака легких, вызванного радоном, в США 21 000 онкологических заболеваний в год вызвано радоновой радиацией, а в Нидерландах из 8 000 смертей в год от рака лёгкого 1 000 относят за счёт радона [8].

Вероятность возникновения рака легкого зависит от индивидуальных свойств человека (общего состояния организма, возраст и пол), но главным образом определяется уровнем и продолжительностью облучения. В исследованиях, проведенных Агентством по охране окружающей среды США (US EPA) утверждается, что при увеличении объемной активности радона в помещениях с 25 до 200 Бк/м³ число случаев возникновения рака легкого увеличивается в 10 раз. В Публикации 115 Международной комиссии по радиологической защите доказательства повышенного риска для населения при облучении радоном с объемной активностью даже менее 100 Бк/м³ признаны неоспоримыми. Также установлено, что наиболее подвержены негативному воздействию радона дети в возрасте до 10 лет и курящие.

Детский организм имеет ряд биологических особенностей, поэтому его реакция на действие ионизирующего излучения более выражена, чем у взрослых. Наибольшая чувствительность к действию радиации отмечается в 6 лет, а к 20 годам формируется половина ущерба от радоновой экспозиции. Негативное воздействие на организм человека может усиливаться рядом факторов окружающей среды, из которых курение является наиболее значимым. В данном случае имеет место синергизм действия — ущерб от облучения

радоном и табакокурения значительно превосходит сумму ущербов от каждого из этих факторов при их самостоятельном действии. Так, онкогенный эффект действия радона на курящих возрастает до 10 раз и кроме этого сокращается скрытый период развития рака легких [33].

Напротив, при исследовании связи частоты онкозаболеваемости с уровнем радона в жилье американским ученым Коэном было установлено, что риск возникновения рака легкого выше для жителей с более низкими концентрациями радона в зданиях (объем выборки составил 200 млн человек или 80 % населения США) [118]. Таким образом, требует дальнейшего изучения вопрос влияния малых доз на организм человека. Точная оценка риска от облучения в малых дозах крайне сложна, так как на население одновременно действует целый ряд канцерогенных факторов нерадиационной природы, зачастую представляющих куда большую опасность.

1.5. Методы и средства измерения уровней радона в воздухе помещений

Методы определения уровней радона в воздухе помещений можно классифицировать по различным признакам (рис. 1.6).

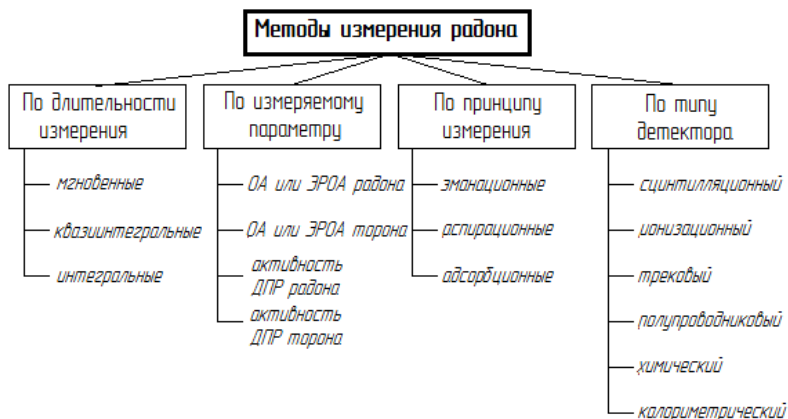


Рисунок 1.6 — Классификация методов измерения радона

Продолжительность мгновенных методов измерения радона составляет от нескольких минут до нескольких часов, в то время как интегральных — от нескольких дней до нескольких месяцев. Квазиинтегральные методы занимают по продолжительности промежуточное положение, для них время измерений лежит в интервале от одного до нескольких дней. Интегральные методы позволяют изучать временные вариации уровней радона, благодаря чему широко используются в разного рода национальных радоновых программах, однако в последнее время все большее распространение получают краткосрочные измерения с использованием поликарбонатных детекторов [131].

Эманационные методы применяются для количественного анализа изотопов радона и их ДПР, они состоят в анализе отобранной пробы в закрытой камере (измерения радона) или струе проходящего воздуха (измерения торона).

В *аспирационных методах* производится осаждение радона и его ДПР на фильтр при прокачивании определенного объема воздуха с последующим анализом активности фильтра методами α -спектрометрии. Метод фильтров чаще всего используется в экспрессных испытаниях, где его результаты носят оценочный характер, а для учета суточных и сезонных вариаций необходимо проведение значительного числа измерений. Альфа-спектрометрия и альфа-радиометрия являются наиболее простыми методами определения уровней ДПР радона в воздухе жилых и служебных помещений, однако для повышения их точности измерений необходимо учитывать абсорбцию альфа-частиц в фильтре и эффективность самого фильтра, что несколько усложняет калибровку измерительного оборудования [165].

Одним из наиболее распространенных адсорбционных методов определения уровней радона на данный момент является его поглощение в активированном угле с последующим измерением активности дочерних продуктов распада методами γ -спектрометрии [168].

Метод определения содержания ДПР радона и торона в воздухе помещений по измерению активности фильтра во время прокачки и после нее описан в [193]. Концентрация радона определялась посредством измерения альфа-активности фильтра, наиболее высокую чувствительность данный метод показал при измерениях по ^{214}Po вследствие его малого периода полураспада. Содержание

торона и его ДПР определялось путем измерения альфа- или бета-активности фильтра после прокачки.

Часто методы измерения изотопов радона и их дочерних продуктов распада классифицируют по типу используемого детектора. При сцинтилляционном методе α -частицы, образовавшиеся в результате распада радона и его ДПР, вызывают вспышки сцинтиллятора (ZnS или NaI) на стенках камеры, регистрируемые фотоэлектронным умножителем [159]. По величине тока или скорости счета вспышек определяется активность радона. Модификация сцинтилляционного метода измерения уровней радона посредством его абсорбции в поликарбонатном порошке выполнена в [163], где оценка ЭРОА производится посредством подсчета сцинтилляций зерен поликарбоната при их облучении. Использование предложенной методики позволяет 13,6 раза увеличить эффективность использования сцинтилляционного детектора и в 6,5 раз снизить его предел чувствительности.

Трековый метод состоит в анализе структурных разрушений, вызванных движением в детекторе заряженных частиц, с последующим их автоматическим подсчетом и переводом в единицы активности. Он широко используется в интегральных измерениях, поскольку допускает одновременное использование большого числа детекторов и их последующую обработку в автоматическом режиме при помощи искровых счетчиков или специальных сканеров [15]. Оригинальный оптический метод подсчета треков с использованием сканера и радоновых детекторов из нитроцеллюлозной пленки LR-115 предложен в [122]. От стандартных технологий его отличает простота и дешевизна, а использование сканера с программным обеспечением позволяет сделать процедуру подсчета треков неразрушающей. Сравнение результатов данного метода с результатами искрового подсчета треков показывает его достаточную точность.

При использовании полупроводников в качестве детекторов регистрируется ток во внешней цепи, вызванный образованием пар «электрон-дырка» под действием ионизирующего излучения и их движением. *Химический метод* основан на свойствах ряда веществ изменять структуру или цвет в результате окислительно-восстановительных реакций, а при *калориметрическом методе* измеряется количество теплоты, выделяющейся в детекторе при поглощении данного излучения.

Наряду с вышеперечисленными, в последнее время появился ряд достаточно новых методов. Метод прямого измерения уровней ДПР ^{222}Rn в легких рабочих с использованием пересчитывающей системы представлен в [207]. В натурную модель легких из уретановой пены помещается детектор из активированного угля, предел обнаружения при продолжительности измерений 4 000 с для ДПР ^{214}Bi составлял 7,3 Бк.

Наиболее эффективным современным методом измерения уровней радона является ретроспективная дозиметрия, задачей которой является определение доз внутреннего облучения в данном помещении на протяжении длительного временного промежутка. Суть данного метода состоит в прямом измерении долгоживущих ДПР ^{210}Po и ^{210}Pb , осажденных на гладких поверхностях (чаще всего — стеклянных). Концентрация данных изотопов напрямую связана со средней за исследуемый период концентрацией радона в воздухе помещения [188].

Перечень *средств измерения*, используемых к настоящему времени в разных странах, достаточно широк, на рис. 1.7 предложена их упрощенная классификация. Одними из наиболее совершенных средств измерения остаются многопараметрические радоновые мониторы «AlphaGUARD» производства «Genitron Instruments GmbH» (Германия).

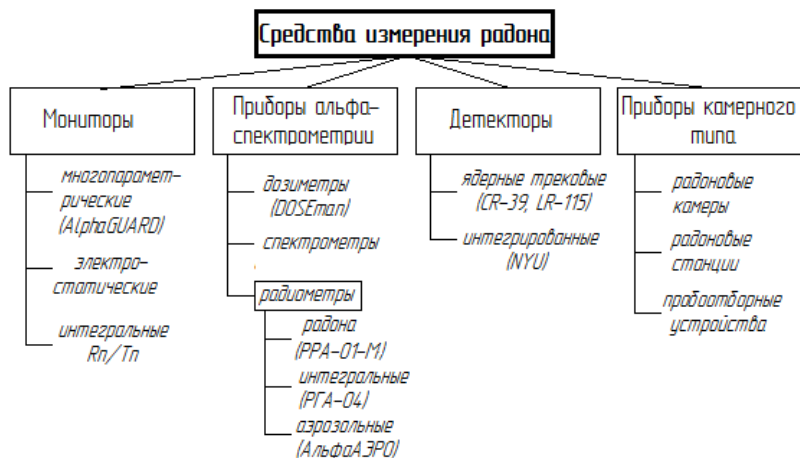


Рисунок 1.7 — Классификация средств измерения радона

Модель «AlphaGUARD PQ 2000» (рис. 1.8, а), обеспечивает непрерывную регистрацию и хранение в памяти результатов измерения объемной активности радона, а также микроклиматических параметров прокачиваемого воздуха. В [81] данная модель использовалась в при изучении распределения уровней радона по высоте закрытых помещений, в [153] — для определения концентрации радона в питьевой воде и почвенном воздухе, а также в экспериментах при проведении радонового картирования территории практически во всех странах Западной и Центральной Европы [91; 95; 129; 198].

В Российской Федерации широко используется продукция приборостроительной компании «НТМ-Защита», выпускающей радиометры радона РРА-01М-01 «Альфарад» (рис. 1.8, б) и РРА-01М-03, позволяющие измерять ЭРОА радона в воздухе в диапазоне от 10 до 10 000 Бк/м³ с погрешностью до 30 %; интегральный радиометр радона РГА-04, радиометр аэрозолей РАА-10, радоновую станцию СРС-01/05 и пробоотборное устройство ПОУ-04 [4].



Рисунок 1.8 — Средства измерения радона: а — AlphaGUARD, б — РРА-01М-01 (Альфарад)

Аэрозольный альфа-радиометр «АльфаАЭРО» способен выполнять как краткосрочные (не более трех часов), так и длительные (до 14 суток) измерения без замены фильтра с интервалом регистрации 1–3 часа и учетом остаточной активности ДПР радона на фильтре [81]. Принцип его действия состоит в одновременном измерении ОА и ЭРОА радона, а также отношения альфа-активности

осажденных на фильтр ДПР ^{218}Po и ^{214}Po , последний из которых всегда находится в радиоактивном равновесии с ^{214}Bi .

Среди отечественных образцов измерительной техники также следует отметить радиометр дочерних продуктов радона «АТ-ЛЕШ-1м» (рис. 1.9), разработанный НПО «Опыт» (г. Луганск) и предназначенный для экспрессных, квазиинтегральных и интегральных измерений ЭРОА радона аспирационным методом. Диапазон измерений данного радиометра составляет от 2 до 9999 Бк/м³ с допускаемой относительной погрешностью, зависящей от объема прокачиваемого воздуха и концентрации в нем радона (табл. 1.6).

Таблица 1.6 — Погрешность измерений радиометра «АТЛЕШ-1М», %

Объем прокачки воздуха, л	ЭРОА радона в прокачиваемом воздухе, Бк/м ³			
	2–25	25–50	50–100	более 100
150	50	25	8	6
200	30	15	6	5
300	25	10	5	3

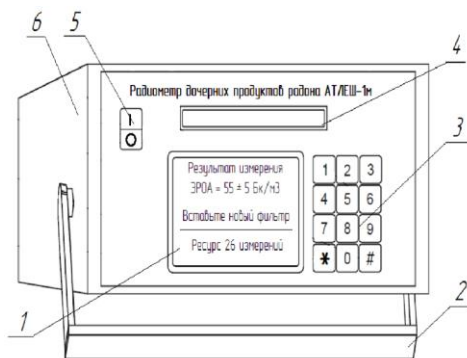


Рисунок 1.9 — Радиометр дочерних продуктов распада радона «АТЛЕШ-1м»: 1 — жидкокристаллический экран; 2 — ручка для переноса прибора и его установки в рабочее положение; 3 — панель управления; 4 — держатель кассеты с фильтром; 5 — кнопка включения/выключения; 6 — корпус прибора

Принцип действия радиометра состоит в прокачивании через фильтр АФА-РСР-10 определенного объема воздуха (регулируемого напряжением на вентиляторе воздухозаборного устройства)

при неизменном времени прокачки (3 мин). Перед прокачкой прибор в течение 5 мин производит измерение фона, анализ активности фильтра начинается со второй минуты прокачки и завершается через пять минут после окончания прокачки. В радиометре возможно задание величины фона по умолчанию без его измерения.

Питание радиометра возможно от сети переменного тока напряжением 220 ± 20 В и частотой 50 Гц или от встроенного аккумулятора. Время непрерывной работы от аккумулятора зависит от величины напряжения на вентиляторе воздухозаборного устройства и составляет от 16 до 22 часов. Радиометр «АТЛЕШ-1м» рассчитан на эксплуатацию при температуре от -20 до $+50$ °С и относительной влажности до 80 %. Его масса составляет 8 кг при габаритных размерах $380 \times 200 \times 170$ мм. Радиометр выполнен в виде портативного прибора, конструктивно он состоит из трех основных элементов: блока питания, воздухозаборного устройства и блока управления и измерений. Блок управления и измерений осуществляет управление прокачкой воздуха, преобразование, обработку и выведение на дисплей результатов измерений, в качестве детектора в нем используется газоразрядный счетчик Гейгера-Мюллера типа СИ8Б. Блок питания обеспечивает подачу необходимого напряжения на счетчик импульсов и электрическое питание радиометра в целом. Воздухозаборное устройство обеспечивает прокачку воздуха через фильтр для осаждения на него ДПР радона.

Электрические импульсы, образующиеся под воздействием на детектор альфа- и бета-частиц, усиливаются зарядочувствительным предусилителем и поступают на вход амплитудно-цифрового преобразователя, после чего обрабатываются микропроцессором. Импульсы регистрируются счетчиком микропроцессора, а результаты подсчета выводятся на жидкокристаллический дисплей.

Основным достоинством радиометра дочерних продуктов радона «АТЛЕШ-1М» является возможность проведения циклических измерений ЭРОА радона произвольной длительности без замены фильтра. Предусмотрено задание периодичности измерений и объема прокачиваемого воздуха в автоматическом режиме работы радиометра. Объем прокачки целесообразно задавать по результатам пробного измерения ЭРОА радона в воздухе исследуемого помещения, его изменение реализуется посредством установки напряжения на насосе воздухозаборного устройства в пределах от 6 до 12,5 В при неизменном времени прокачки (3 мин).

В режиме циклических измерений фильтр загрязняется дочерними продуктами распада радона, которые могут вносить вклад в последующие измерения, снижая достоверность полученных результатов. Для устранения влияния осевших на фильтр ДПР радона перед каждым следующим измерением производится обязательное измерение величины фона. Эта величина (для всех измерений кроме первого) складывается из мощности эквивалентной дозы внешнего гамма-излучения и остаточной активности фильтра. Поскольку наибольший период полураспада короткоживущих ДПР равен 28,6 мин, то минимальное время между двумя последующими измерениями не должно быть меньше 60 мин.

Наряду с аспирационными фильтрами широкое распространение в последнее время получили трековые технологии. Интегрирующие трековые радиометры типа ТДА-01 применяются для определения средней концентрации радона в воздухе помещений за длительный период (до нескольких месяцев). Принцип действия основан на облучении нитрат-целлюлозных детекторов, предварительно откалиброванных в радоновой камере, с последующим автоматическим считыванием числа треков на искровом счетчике [15].

Трековым методом были проведены натурные измерения концентраций радона в зданиях Екатеринбурга, построенных после 2005 года [14]. Измерение средних уровней радона в жилищах Израиля производилось на основе длительных измерений с использованием детектора CR-39 (рис. 1.10, а) из полиалиллдигликолькарбоната $C_{12}H_{18}O_7$ [89], они же использовались при измерении уровней радона в рамках национального исследования уровней радона в Канаде [91], в аналогичных исследованиях в Турции использовались пассивные альфа-трековые детекторы LR-115 Type II производства *Kodak* [148]. Таким образом, трековые детекторы широко применяются в национальных радоновых программах за рубежом.

Интегрированный *Rn-Tn* детектор, разработанный Национальным институтом радиологической защиты (Китай), прошел четыре цикла независимых испытаний в Китае и Японии по измерению различных уровней радона и торона. При этом максимальная погрешность определения активности радона и торона в воздухе не превышала 30 %, а результаты измерений согласовывались между собой [204]. В работе [143] пассивные интегрированные *Rn-Tn* детекторы RADOPOT применялись для одновременных измерений активности радона и торона (рис. 1.10, б). Одновременное

использование четырех чипов CR-39 снижало погрешность и улучшало чувствительности устройства.

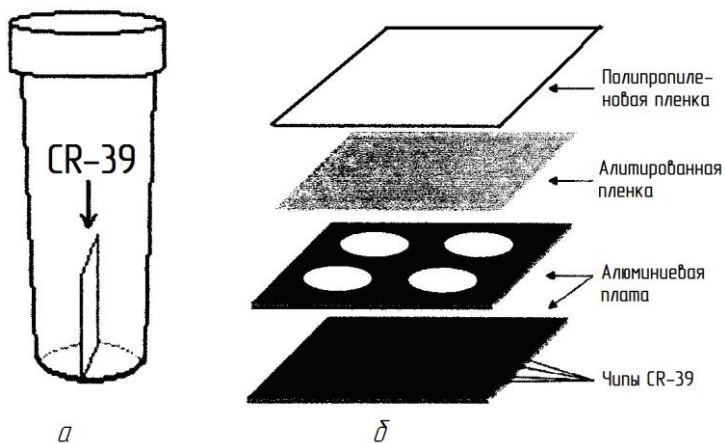


Рисунок 1.10 — Альфа-трековые измерительные устройства: а — традиционная схема; б — модифицированная схема

При оценке уровней радона в жилых и служебных помещениях в Иране использовались чувствительные к альфа-излучению дозиметры DOSEman и SARAD GmbH (Германия), позволяющие кроме уровней радона определять еще и величину потенциальной энергии альфа-излучения [93]. Для измерений ОА радона в воздухе помещений и плотности потока радона с поверхности пола в [78] авторы применяли детекторы в виде ячейки Лукаса, работающие в режиме непрерывной прокачки воздуха и откалиброванные при помощи радонового монитора «AlphaGUARD». Переносное устройство на основе детектора *Timepix* с активным слоем толщины 300 мкм из силикона и *CdTe* использовалось для интегральных измерений ЭРОА радона в работах [107–108]. Его работа основана на анализе активности фильтра по альфа-распадам короткоживущих ДПР ^{214}Po и ^{218}Po после завершения прокачки.

Значительный практический интерес вызывает проблема корректности результатов измерения уровней радона и его продуктов распада [146]. Установлено, что результаты прямых измерений радона при помощи радоновых камер дают хорошие результаты — в 80 % измерений погрешность приборов не превышает 5 %,

в то же время, как такая же погрешность для мониторов непрерывного измерения ЭРОА радона достигается только в 40 % измерений. Сравнение результатов измерений мониторов радона/торона и пассивных детекторов показывает их систематическое расхождение до 40 %, указывающее на необходимость регулярной калибровки подобных приборов.

Точность измерения мониторов радона и торона оценивалась в Национальном институте радиологических наук (Япония) путем сравнения их показаний с радоновыми и тороновыми камерами [144]. Испытания, проведенные на двух различных уровнях радона и торона, показали устойчивость измеряемых параметров и погрешность не более 10 % для мониторов радона при необходимости дальнейшего совершенствования техники и методики измерений по торону. Для повышения точности калибровки альфа-спектрометров и альфа-радиометров измерения ЭРОА радона в воздухе помещений в [165] был использован гамма-спектрометр, при этом погрешность измерений по ^{214}Bi находилась в диапазоне 3–6 % даже на относительно невысоких уровнях радона.

Интегральные 8-недельные измерения уровней торона в жилых домах Германии, построенных с использованием необожженной глины, производились посредством автономного устройства измерения ДПР торона (UBPM), использующего высоковольтное электрическое напряжение в сочетании с трековыми детекторами [128]. Для измерения активности смеси изотопов ^{222}Rn и ^{220}Rn в воздухе в [110] использован электростатический альфа-монитор, принцип действия которого основан на разделении пиков альфа-излучения ДПР обоих изотопов при помощи фильтра *Tyvek*. Результаты измерений при различных уровнях радона и торона в воздухе отличались хорошей разрешающей способностью и стабильностью во времени. В [131] показана перспективность использования высокочувствительных полиалиллдигликолькарбонатных (PADC) детекторов при краткосрочных измерениях концентрации радона в воздухе помещений.

Таким образом, в настоящее время разработано и эксплуатируется достаточно большое количество средств измерения активности радона и его продуктов распада, позволяющих решать научные и прикладные задачи, направленные на обеспечение радонобезопасности зданий и сооружений.

ГЛАВА 2

Современное состояние радоновой проблемы в Российской Федерации и за рубежом

2.1. Радоновые исследования в зарубежных странах

В настоящее время уже не вызывает сомнений тот факт, что радон-222 и его короткоживущие дочерние продукты распада являются основным дозообразующим фактором, формирующим большую часть индивидуальной годовой дозы облучения населения Российской Федерации и зарубежных стран. Облучение радоном в быту существенно превышает по мощности остальные источники радиационного облучения населения, являясь второй по тяжести (после курения) причиной смертности от рака легкого. Однако для формирования современных представлений о негативном влиянии радона на население потребовалось достаточно много времени.

Еще в XVI веке имела место повышенная смертность горняков железорудных шахт центральной Европы от неизвестной болезни органов дыхания. Но только в начале XX века было установлено, что этой болезнью является рак легких. Практически сразу после открытия радона в 1900 году он (вместе с силикозом) был признан причиной повышенной смертности шахтеров металлических рудников Чехии и Германии, чему способствовало установление высоких уровней радона в этих шахтах. В последующие полвека высокие концентрации радона отмечались в основном в подземных выработках, а облучение радоном рассматривалось исключительно в контексте возникновения рака легких у работников урановых шахт.

Первое упоминание о бытовой опасности радона относится к 1956 году, когда в Швеции были обнаружены дома с его концентрациями, характерными для урановых шахт [164]. Однако данная ситуация была воспринята как сугубо шведская проблема и потому

не вызвала достаточного интереса. Старт системным исследованиям в данной области был положен обнаружением в начале 70-х годов прошлого века высоких концентраций радона сразу в сразу трех скандинавских странах — Норвегии, Швеции и Финляндии. Их причиной был признан выход на поверхность богатых ураном гранитов и высокопроницаемых мореновых и озолитовых рыхлых отложений. Чуть позже аномально высокие концентрации радона в зданиях (десятки-сотни тысяч Бк/м³) были выявлены и на Британских островах. В Соединенных Штатах Америки неблагоприятная радоновая обстановка была установлена в домах штата Флориды, построенных на богатых радием фосфатных грунтах и на участках, загрязненных отходами переработки урана. В Канаде и Австралии в этот период времени в строительстве также использовались отходы переработки урановых руд, что привело к концентрациям радона в воздухе помещений до 1 500 Бк/м³.

В результате обобщения результатов исследований подобных аномалий сформировалась первая парадигма обеспечения радоновой безопасности зданий: повышенное облучение радоном в зданиях возможно на ограниченных территориях, образованных ураноносными грунтами, которые легко обнаруживаются посредством γ -мониторинга. При этом сам радон не является проблемой государственного масштаба ввиду незначительного процента населения, проживающего в таких условиях. Эффективность реконструкции грунтового основания и применения барьеров на радоноопасных территориях утвердили диффузионную модель переноса радона из грунта в воздух помещений нижнего этажа. А поскольку источники диффузии радона имеют практически постоянную мощность, то было принято, что среднегодовая концентрация в зданиях может быть оценена по результатам одного краткосрочного измерения.

Ситуация изменилась коренным образом в конце 1970-х, когда в ряде канадских городов были выявлены дома с концентрацией радона 750 Бк/м³ в отсутствие близко расположенных источников радия высокой мощности. Фактическая скорость поступления радона в эти дома в десятки раз превышала предсказываемую диффузионной моделью и испытывала значительные временные вариации. Это привело к разработке конвективной модели, согласно которой главную роль в формировании радоновой ситуации в здании играет не мощность источника, а объем грунта, из которого радон способен поступать в воздух помещения. Движущей силой переноса радона

в таких условиях является разность давлений внутри и снаружи помещения, вызванная разностью температур воздуха (стек-эффект).

Смена парадигмы имела сразу два важных последствия для строительной отрасли. Во-первых, даже почвы с невысоким содержанием радия (до 40 Бк/кг) способны обеспечивать высокие уровни радона в помещениях нижнего этажа, а γ -спектрометрический анализ уже не выявляет потенциально радоноопасные участки. Во-вторых, поступление радона в здания управляется параметрами, находящимися в постоянном изменении, а потому имеет переменный характер и требует долгосрочных измерений для оценки среднего (сезонного) значения.

Новая парадигма дала импульс радоновым исследованиям во всех развитых странах, поскольку оказалось, что радоноопасные здания могут присутствовать на любых территориях. Однако такие не были обнаружены повсюду, что можно объяснить только необходимостью определенных условий для формирования высоких уровней радона в воздухе помещений. Стало очевидно, что определение этих самых условий позволит идентифицировать потенциально радоноопасные районы. Поиск сочетания параметров, ответственных за большие плотности потоков радона в зданиях, ознаменовал собой заключительную фазу исследований радоновой проблемы. В той или иной степени исследования потенциальной радоноопасности территорий проведены во всех развитых странах, ниже кратко рассмотрены особенности национальных подходов к обеспечению радоновой безопасности зданий.

Повышенной радоноопасностью отличаются три страны Северной Европы — Финляндия, Швеция и Норвегия, что можно объяснить крупным выходом на поверхность богатых ураном почв и горных пород, таких как квасцевые сланцы и граниты, а также высокопроницаемых моренов и озолитов.

В Финляндии из 107 000 квартир многоэтажных домов уровни радона были исследованы в 5 560. Объемная активность радона в квартирах нижнего этажа не отличалась от активности в индивидуальном жилье той же области, а уровни радона на верхних этажах были в три раза меньше и не зависели от высоты, что указывает на их формирование за счет выделения радона из строительных материалов. Кроме этого, в Финляндии было проведено более 500 измерений в рамках сравнительной оценки концентрации радона в жилье и на рабочих местах. Геометрическое среднее активности

радона в жилье составило 68 Бк/м³, тогда как в офисных помещениях — 20 Бк/м³ [160].

В 2003–2004 годах Финляндии были изменены строительные правила в вопросах защиты помещений от радона, что позволило снизить на 33 % (до 58 Бк/м³) уровень объемной активности радона в воздухе 1 500 новых малоэтажных домов по сравнению с такими же, возведенными ранее [69; 98]. При этом достигнутое снижение составило 47 % в провинциях с наиболее высокой концентрацией радона в помещениях и 26 % — по всей территории.

Прогноз радоноопасности финских зданий строится на основе классификации их оснований, уровней радона в них, а определение границ участков выполняется при помощи геологических карт. В домах с фундаментом в виде плавающей плиты с пассивным запечатывающим барьером в виде полосы битума между основной и этажной стенами концентрации радона в среднем ниже на 57 % по сравнению с домами без радонозащиты. Противорадоновые мероприятия охватили по стране 54 % особняков, а в наиболее радоноопасных провинциях — более 90 % домов.

Группой финских ученых на протяжении 10 лет изучалось влияние характеристик почвы на сезонные колебания уровней радона в грунте и помещении [97]. Теоретические и экспериментальные результаты показали, что изменение влажности почвы является важным фактором, влияющим на сезонные колебания концентрации радона в грунте. Распределение радона между водной и воздушной фракциями почвенных пор является основным фактором повышения его концентрации: так, увеличение влажности почвы осенью и весной после таяния снега повышает концентрацию радона в почве на 10–20 %. Более высокая температура почвы летом также увеличивает концентрацию радона в ней на 14 % по сравнению с зимними значениями. Ежемесячные измерения радона в помещениях производились на протяжении года в 326 финских домах, при этом концентрации радона осенью и весной были выше, что авторы объясняют сезонными колебаниями влажности грунта. Таким образом, изменение влажности является фактором, заметно влияющим на годовые и сезонные изменения концентрации радона в зданиях, отмечаемые многими исследователями.

Наиболее остро радоновая проблема стоит в богатой урановыми месторождениями Швеции. Во многих шведских домах величина объемной активности радона в десятки-сотни раз превышает

национальный контрольный уровень в 400 Бк/м^3 . Также к росту радоноопасности шведского жилья привела политика повышения энергоэффективности городского хозяйства, реализуемая с 1970-х годов. Снижение кратности воздухообмена наряду с повышением герметичности светопрозрачных ограждающих конструкций создало условия для сверхнормативного накопления радона в зданиях. С целью нормализации радоновой обстановки в стране правительство взяло на себя оплату расходов по проведению радонозащитных мероприятий в домах, где первоначальная объемная активность превышала 400 Бк/м^3 .

В Норвегии проведены крупномасштабные исследования жилищного фонда, по результатам которых средний уровень радона в норвежском жилье оценен в 88 Бк/м^3 [194]. Превышение национального уровня действия в 200 Бк/м^3 отмечено для 9 % (175 000) объектов, при этом около 30 000 норвежцев живут в домах концентрацией радона более $1\,000 \text{ Бк/м}^3$ [145]. Максимальные среднегодовые уровни радона в $56\,000 \text{ Бк/м}^3$ были зарегистрированы в домах, расположенных на высокопроницаемых ледниковых отложениях [197].

В Великобритании анализ результатов измерений, выполненный группой С. Дарби в рамках реализации национальной радоновой программы, показал, что радон в помещениях ответственен за 2 000 смертей в год от рака легкого. Это составляет 6 % от общего числа смертей, являясь второй по частоте причиной смертности после курения. Более 80 % смертей происходит в возрасте до 75 лет и более 80 % — у курильщиков или экс-курильщиков. Около 90 % смертей от радона в помещениях Соединенного Королевства вызвано облучением дозами ниже рекомендованного уровня действия 200 Бк/м^3 [121].

Также установлено, что треть домов в графствах Корнуэлл и Девон имеют объемную активность радона в воздухе помещений более 200 Бк/м^3 , подобные местности найдены и в других частях Англии [120]. Для улучшения радиационной обстановки средствами массовой информации была проведена масштабная кампания по информированию населения об опасности радона, а также средствах и методах снижения его негативного влияния. В настоящее время на Британских островах завершено картирование территории — комплексная оценка потенциальной радоноопасности жилья

в данной местности по результатам измерения факторов формирования радоновой обстановки различной природы.

В Ирландии радон также является существенной проблемой охраны здоровья, с ним связывается 150–200 смертей от рака легкого ежегодно. Ирландская национальная радоновая программа призвана сократить коллективную дозу от ДПР радона за счет выявления зданий с высокими концентрациями радона и предотвращения его поступления посредством ужесточения строительных норм и правил [125]. К настоящему времени достигнуты существенные успехи, включающие составление Национального Обзора по радону, измерения ОА радона в каждой школе Ирландии, продолжаются обследования социального жилья, измерение уровней радона является обязательным элементом при аттестации рабочих мест.

Аномально высокая смертность шахтеров («горная болезнь») впервые была отмечена еще в средние века на территориях современных Чехии и Германии. Поэтому неудивительно, что в этих странах проблеме облучения радоном уделяется повышенное внимание. В Чехии используется комплексный подход к оценке уровней радона в отдельных зданиях, основанный на изучении механизмов переноса радона из почвы путем одновременных измерений содержания радона в помещениях и в почвенном воздухе [126]. Кроме того, в Чехии находится около 7 000 хранилищ отходов горнодобывающей промышленности, в окрестности которых концентрация радона на открытом воздухе может достигать тысяч Бк/м³, а средняя активность в воздухе близлежащих помещений превышает 450 Бк/м³ [201].

В Германии геофизическая информация является критерием оценки радоноопасности территории. По результатам анализа геологических карт устанавливаются границы исследуемых участков, а показатель их радоноопасности определяется при измерениях объемной активности радона в почвенном воздухе, удельной активности радия в грунте и воздухопроницаемости самого грунта. Наряду с достаточной простотой подобного подхода, его основным недостатком можно считать исключение из рассмотрения факторов негеологической природы, также существенно влияющих на процесс накопления радона в помещениях. В настоящее время в Германии ежегодно около 3 400 случаев рака легких связывают с бытовым облучением радоном [102].

Согласно законодательству Австрии, оценки доз на рабочих местах с потенциально высокими концентрациями радона обязательны начиная с 2008 г., в том числе для туристических шахт и пещер. Результаты исследования уровней радона в шести шахтах и трех пещерах на протяжении года, наряду с определением уровней торона и коэффициента сдвига равновесия в них с учетом климатических и геологических эффектов представлены в [130]. Установлено, что уровни радона имеют сезонную зависимость с максимумом летом и минимумом зимой, при этом в карстовых пещерах они незначительны, тогда как в медных и серебряных шахтах достаточно высоки.

В Словакии оценка радоноопасности жилья производилась в окрестности атомной электростанции в Моховце с целью сопоставления вкладов в годовую дозу облучения естественных и искусственных источников ионизирующего излучения. В результате установлено, что для данной территории эффективная доза облучения населения природными радионуклидами находится в пределах от 5,4 до 14,6 мЗв, что на четыре порядка выше, чем вклад радиоактивных выбросов атомной электростанции [109]. Оценка потенциальной опасности областей Словацкой Республики производится на основании измерений радона внутри помещений и доступных данных о концентрации радона в почвенном воздухе, между которыми обнаружена примерно линейная зависимость.

Совместные длительные измерения концентрации радона проведены в детских садах стран Словакии, Венгрии и Польши. По результатам обследования 67 комнат в 20 детских садах в период с октября 2015 по март 2016 года установлено, что активность радона не превышают 300 Бк/м³ более чем в 80 % случаев. В то же время, в Словакии были обнаружены помещения в детских садах с уровнями радона более 1000 Бк/м³ [166]. Результаты сравнительной оценки степени радоноопасности домов старой и новой постройки в Венгрии описаны в [148]. Мощность дозы от ДПР радона составила 0,83 мЗв/год в старых и 0,17 мЗв/год в новых помещениях, а вклад ДПР торона не превышал 5 %, что позволяет говорить о сравнительно низкой радоноопасности жилищного фонда.

В Бельгии разрабатывается система прогнозирования потенциально радоноопасных областей, основанная на связи воздухопроницаемости грунта и содержания в нем ²²⁶Ra и ²²²Rn с уровнями радона в помещениях. По результатам экспериментов не выявлено

достоверной корреляции между удельной активностью радия в почве и объемной активностью радона в помещении, при этом наибольшее влияние на уровни радона в зданиях оказывала воздухопроницаемость грунта [157]. Разработанная на основе экспериментальных данных модель позволила определить область Валлун на юге Бельгии в качестве потенциально радоноопасной территории [202], то есть области, в которой уровни радона превышают национальный референтный уровень 300 Бк/м³ более чем в 1 % домостроений.

По результатам обследования 2 500 частных домостроений старой постройки в Нидерландах установлена крайне невысокая радоноопасность территории государства. Средняя объемная активность радона в них составляет $15,6 \pm 0,3$ Бк/м³, что позволяет властям планировать введение достаточно низкого национального эталонного уровня для радона в жилищах, равного 100 Бк/м³, хотя в этом случае около 24 тысяч из 6,2 миллиона жилищ в Нидерландах (построенных после 1930 года) превысят этот уровень. Концентрации радона свыше 200 Бк/м³ в Нидерландах достаточно редки, а потому для нормализации радоновой обстановки чаще всего достаточно проведения простых и незатратных защитных мероприятий [191]. Но даже в условиях столь малых уровней радона в жилье около 400 случаев рака легкого в год, по мнению эпидемиологических служб Нидерландов, вызываются действием дочерних продуктов распада радона и торона.

В Португалии повышенная радоноопасность зданий характерна для богатой гранитами области Гварда. При обследовании 185 помещений средняя по провинции активность радона составила 860 Бк/м³ (эффективная доза порядка 15 мЗв/год) при разбросе значений ОА радона от 75 до 7640 Бк/м³, что значительно выше, чем в других областях Португалии [158].

В Испании измерения уровней радона в жилье, в первую очередь, рассматриваются в контексте картирования территории, необходимого для понимания степени радоновой опасности [187]. Около 12 000 измерений радона выполнено к настоящему времени в рамках Испанской национальной радоновой программы. Ее результатом стало построение первого варианта карты радоноопасности сооружений, при этом деление территории на участки производилось по сетке размером 10×10 км².

В Италии исследования уровней радона в жилье и на рабочих местах выполняются с начала 1990-х годов, всеми итальянскими регионами выполнена оценка радоновой опасности зданий, однако с использованием различных методик, что затрудняет сравнение результатов. На протяжении 8 лет для рабочих мест, расположенных под землей, выполнено 8 695 годовых измерений уровней радона, по результатам которых разработана карта среднегодовых уровней радона для различных территорий [186].

Масштабный сравнительный анализ уровней радона в жилых и служебных помещениях проводился на протяжении трех лет в Тоскане (Центральная Италия). Измерения в 1541 жилом и 1159 рабочих помещениях показали, что активность радона на рабочих местах на 14 % выше, чем в жилье [106]. Для рабочих помещений нижнего этажа уровни радона находились в пределах от 20 до 5 000 Бк/м³, испытывая при этом значительные временные вариации. В Южной Италии в провинции Пениццола Сорентина концентрация радона измерялась на протяжении года в спальнях и гостиных 93 жилых помещениях. Диапазон изменений составил от 25 до 722 Бк/м³ при среднем значении 132 ± 114 Бк/м³ и средней эффективной годовой дозе облучения 2,4 мЗв [177].

Измерения активности радона также были выполнены в очень старых зданиях семи музеев Неаполитанского университета, имеющих большую историческую ценность. Среднегодовые значения лежали в диапазоне от 40 до 1935 Бк/м³, а в 26 % участков измерения превышали предельную допустимую для рабочих мест величину активности радона в 500 Бк/м³ [178]. Что характерно, наиболее высокие уровни радона в помещениях имели место в холодную погоду. Еще одна интересная зависимость была выявлена в городе Алессандрия на северо-западе Италии при непрерывном измерении концентрации радона в наружном воздухе [202]. Оказалось, что концентрации радона в течение дня хорошо коррелируют с концентрацией главных городских загрязняющих агентов, поэтому радон в городской атмосфере может быть использован как индикатор транспортных выбросов.

В Греции и Испании, наряду с измерениями уровней радона в зданиях, учитываются результаты измерений объемной активности радона в почвенном воздухе и содержание радия в грунте, с которыми соотносится карта естественного радиационного фона. Оценка влияния режима эксплуатации здания на уровни радона

в нем выполнена в [117] в рамках радонового мониторинга 77 школ префектуры Ксанти (Греция). Авторами используется понятие «истинной» концентрации радона, определяемой во время присутствия в школе преподавателей и учеников. Значение данной концентрации в 104 Бк/м³ оказалось в семь раз ниже средней ОА за весь период исследований.

Распределение радона в почве по глубине изучалось на протяжении четырех лет на территории кампуса Университета Аристотеля, характеризующейся почти постоянным распределением радия в грунте [116]. Как и ожидалось, концентрация радона увеличивается с глубиной, ее экспериментальное распределение было получено путем решения общего уравнения диффузионно-адвективного переноса. При помощи данного уравнения авторами была вычислена скорость эксхалации радона из грунта, составившая $26,7 \pm 4,5$ мБк/(м²·ч), полученные результаты получили экспериментальное подтверждение.

В Румынии референтный уровень активности радона в зданиях составляет 300 Бк/м³, его превышение установлено для 3,2 % частных домовладений при комплексном радоновом обследовании 157 жилья территории Муреш (Румыния). При этом внутренние концентрации радона находились в пределах от 9 до 414 Бк/м³ при среднем арифметическом значении 131 Бк/м³ и среднем геометрическом 105 Бк/м³. Средняя концентрация радона в грунте под зданиями составила 14,6 кБк/м³, что указывает на низкую степень радоноопасности данной территории [172].

Широко известна высокая радоноопасность подземных объектов. Так, при исследовании пяти пещер в Румынии концентрация радона в воздухе превышала 4 000 Бк/м³, что требует ограничения пребывания в них исследователей и туристов [111]. В известняковых пещерах активность радона может достигать до сотен тысяч Бк/м³, а в доме одной из деревень в Австрийских Альпах зафиксирована ее величина в 274 000 Бк/м³. Также миллионов Бк/м³ активность радона может достигать в полиметаллических и урановых шахтах.

Длительные измерения уровней радона, выполненные в жилых домах Хорватии в течение 2003–04 гг., показали, что среднее арифметическое концентраций радона в Лика-Сени и южной части провинции Карловац составляет 198 Бк/м³, что в три раза превышает национальный уровень, составляющий 68 Бк/м³ [179].

В Болгарии на протяжении года измерялись концентрации радона в 2 778 жилищах по всей территории страны с целью получения системных данных о его распределении в зданиях. Среднее арифметическое объемной активности составило 111 Бк/м^3 , среднее геометрическое — $81 \pm 2,15 \text{ Бк/м}^3$. По результатам исследования годовая эффективная доза для населения Болгарии от облучения радоном в помещении была оценена в $5,2 \text{ мЗв}$ [154].

Первое масштабное радоновое обследование жилого фонда было проведено в Албании, охватив 247 объектов на 10 % территории в пределах крупнейших городов страны. Концентрации радона внутри помещений находились в диапазоне от 14 до 1238 Бк/м^3 со средним арифметическим значением $120 \pm 67 \text{ Бк/м}^3$ и средневзвешенным значением 101 Бк/м^3 . Полученные результаты указали на необходимость расширения географии измерений по всей территории Албании [105].

Измерение концентрации радона в 142 жилых зданиях различной конструкции турецкого города Эскишехир показало, что ее значения могут многократно отличаться даже в пределах очень небольшой территории [92]. Подобная ситуация может указывать на доминирующую роль конструктивных особенностей зданий в формировании радоновой обстановки. В то же время, измерения в помещениях 20 сельских областей в Турции в течение восьми последовательных месяцев показали изменение активности радона в пределах от 11 до 727 Бк/м^3 со средним геометрическим $63 \pm 2 \text{ Бк/м}^3$ (среднегодовая эффективная доза $1,95 \text{ мЗв/год}$), что значительно ниже национального референтного уровня и рекомендованного МКРЗ уровня действия [147].

Изучение уровней радона в почвенном газе на территории Турции проводились вдоль западного участка Северо-Анатолийской зоны разломов в течение 12 месяцев. Концентрация радона варьировалась от 29 до $7 059 \text{ Бк/м}^3$ со средним значением $1 930 \text{ Бк/м}^3$ [205]. Была выявлена слабая положительная корреляция между средним значением объемной активности ^{222}Rn и температурой воздуха, а также обратная зависимость между уровнем радона и остальными метеорологическими факторами (влажностью, давлением и количеством осадков). Авторы делают вывод о сезонном характере колебаний активности радона в высокопроницаемой песчано-гравийной почве без длительных переходных периодов. При

этом летом отмечены большие средние концентрации радона в почвенном газе (2 372 Бк/м³), чем зимой (1 298 Бк/м³).

Как видно из представленного обзора, радоновые обследования территории, а также жилых и служебных помещений, в том или ином объеме, выполнены во всех европейских странах. Однако подавляющее большинство из них ограничивается оценкой степени радоноопасности жилищного фонда путем установления среднегодовой объемной активности радона в зданиях исследуемой территории. При этом исключаются из рассмотрения факторы, непосредственно формирующие наблюдаемые уровни радона в зданиях, без понимания которых невозможно адекватное понимание закономерностей поступления радона в воздух помещений.

Северная Америка по масштабу проводимых радоновых изысканий, как минимум, не уступает Европе, а США и Канада по праву входят в число мировых лидеров в данном направлении. По данным Агентства по защите окружающей среды, в США ежегодно из-за болезней легких, вызванных наличием радона в зданиях, погибает более 7 000 человек (для сравнения, в автомобильных авариях — 23 000, на пожарах — 4 400 человек). В Канаде 13 % случаев смерти от рака легких среди мужчин и 14 % случаев смерти среди женщин связаны с бытовым облучением радоном [112], которое является второй после курения причиной заболеваемости, а облучение радоном официально признано проблемой государственного масштаба.

Общенациональный мониторинг радоноопасности канадского жилья проводился на протяжении двух лет, для чего по телефонному справочнику было отобрано чуть более 18 000 участников, которые получали по почте пассивные трековые детекторы, размещали их на протяжении года в жилой зоне на первом этаже, после чего отправляли в специализированную лабораторию, которая определяла объемную активность радона в данном помещении [114]. Подобная организация исследований позволила оценить уровни радона практически в 14 000 домов в 121 области по всей территории Канады. Результаты распределения зданий канадских провинций по уровням радона представлены в табл. 2.1.

Исследования показали, что существует несколько регионов страны с более высокими уровнями радона, а процент канадцев, проживающих в домах с ОА более 200 Бк/м³, составил 6,9 %. Кроме того, объединив результаты данного с результатами более раннего изучения уровней радона и торона в 4 000 домов 33 городов

Канады, авторы [114] установили, что средняя объемная активность радона в жилье Канады составляет 77 Бк/м³.

Ряд радоновых исследований выполняется непосредственно силами муниципалитетов. Так, уровни радона и торона в 117 жилых помещениях Виннипега измерялись в течение 3 месяцев и составили $112 \pm 2,07$ Бк/м³ и $21 \pm 2,53$ Бк/м³, соответственно. При этом в 20 % виннипегских домов отмечено превышение национального уровня в 200 Бк/м³, а сам Виннипег имеет самую высокую концентрацию радона в воздухе помещений среди всех канадских городов [115]. В Квебеке при обследовании 65 начальных школ на соответствие национальному контрольному уровню в 200 Бк/м³ средняя объемная активность составила 56 Бк/м³, кроме этого была установлена ее связь с геологическими особенностями территорий [176].

Таблица 2.1 — Распределение зданий по величине объемной активности радона (Канада) [114]

Провинция	Процент зданий с ОА*		
	менее 200 Бк/м ³	от 200 до 600 Бк/м ³	более 600 Бк/м ³
Альберта	93,4	6,0	0,6
Британская Колумбия	92,1	6,7	1,2
Манитоба	76,3	21,1	2,6
Нью Брансуик	75,2	18,7	6,1
Ньюфаундленд и Лабрадор	94,1	4,6	1,3
Новая Шотландия	91,2	6,3	2,5
Северо-Западные Территории	94,6	4,9	0,5
Нунавут	100,0	0,0	0,0
Онтарио	91,8	7,3	0,9
Острова Принца Эдварда	96,5	3,5	0,0
Квебек	89,9	9,0	1,1
Саскачеван	83,7	15,3	1,0
Юкон	80,4	13,8	5,8

*Национальный уровень для ОА радона в зданиях в Канаде составляет 200 Бк/м³.

Также представляет интерес выполненная в Канаде оценка сезонных вариаций объемной активности радона в помещениях, для чего проводились испытания продолжительностью 1, 2, 3 и 6 месяцев. Отличие от среднегодового значения составило для месячных измерений 22 %, для двухмесячных — 17 %; трехмесячных — 14 %;

полугодовых — 9 %, а трехмесячные измерения в отопительный сезон показали превышение среднегодовой объемной активности на 20 % [113]. Вывод авторов о том, что во избежание недооценки облучения радоном проводить измерения следует в отопительный сезон и не менее трех месяцев подряд, может быть использован в отечественной практике измерений ввиду сходных климатических условий ряда регионов РФ и Канады.

Радоновые исследования в Канаде не ограничиваются оценкой уровней радона в зданиях. Поскольку грунт является главным источником поступления радона в здания, то его содержания в почвенном воздухе может использоваться для оценки радона в помещениях. Измерения активности почвенного радона проводились в четырех городах: Монреале, Гатино, Кингстоне и крупнейшем канадском городе Торонто, всего было обследовано 212 участков. Средняя концентрация радона в почве менялась от участка к участку, не превышая значения в 157 кБк/м^3 . Для каждого участка был определен индекс радонового потенциала почвы (*SRP*) вместе со средней концентрацией радона в почве средней проницаемостью почвы. Индексы *SRP* составили 20 ± 16 , 12 ± 11 , 8 ± 9 и 12 ± 10 для Монреаля, Гатино, Кингстона и Торонто, соответственно. Результаты обеспечивают дополнительные данные для подтверждения связи между концентрацией радона в помещениях и радоновым потенциалом почвы для составления карты радоновых потенциалов Канады.

Оценка вклада эксгаляции радона из строительных материалов выполнена в [103]. Определялась скорость выделения радона из 35 образцов канадских производителей, результаты попали в интервал от 2,3 до 479,9 Бк/($\text{м}^2 \cdot \text{сут}$) со средним значением $80,7 \pm 112 \text{ Бк/}(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, которое соответствует объемной активности радона в помещении, равной $32,5 \pm 2,7 \text{ Бк/м}^3$. Данная концентрация составляет порядка 16 % Канадского контрольного уровня, из чего авторы заключают, что выделение радона из ограждающих конструкций очень мало влияет на радоновую ситуацию в помещении.

В Соединенных Штатах Америки в настоящее время выполнены не менее масштабные исследования радоноопасности зданий и территорий правительственными и неправительственными организациями, частными и университетскими научными лабораториями, на государственном уровне и уровне отдельных штатов.

По всем штатам определены средние уровни объемной активности радона в воздухе, грунте и питьевой воде.

Установлено, что среднее по стране значение активности радона в помещениях составляет 55 Бк/м^3 , однако обнаружены жилые здания, в которых активность радона достигает $100\,000 \text{ Бк/м}^3$. В воздухе 5 % американских зданий концентрация радона превышает 150 Бк/м^3 , а в 0,1 % зданий его активность превышает 800 Бк/м^3 . Кроме того, около 3 % из обследованных зданий школ имели уровень радона более 700 Бк/м^3 [181].

Большинство американских исследований не ограничиваются определением среднегодовых активностей радона. В Миссури измерялись и сопоставлялись концентрации радона в воздухе нижнего этажа соседних жилых и рабочих помещений [100]. Целью данного исследования являлось установление принципиальных отличий в уровнях радона в жилых и служебных помещениях, а также потенциальной возможности предсказания ОА радона в ближайших и существующих зданиях по имеющимся данным. Вариации концентраций радона на рабочих местах составили 20 %, а в жилищах 13 %, что объяснялось большей разнородностью типов рабочих помещений и особенностей их использования. Кроме этого, не было установлено статистически достоверных различий объемных активностей радона в жилых и служебных помещениях.

В 158 домах штата Айова на протяжении 1 года циклами по 7 дней изучались временные и пространственные вариации концентраций радона в воздухе подвальных и жилых помещений нижнего этажа. Оценивалась возможность применения краткосрочных измерений для оценки облучения человека радоном в жилых помещениях. Прогностическая ценность краткосрочных измерений составила 44 %, учитывая, что уровни радона в жилой зоне в течение года были равны или выше национального уровня действия, составляющего 150 Бк/м^3 . Результаты исследования показывали, что кумулятивное действие радона более точно аппроксимируется годовыми измерениями в жилой зоне, чем краткосрочными или годовыми измерениями в подвале [101].

Достаточно необычное исследование выполнено в Центральном Нью-Джерси, где в подвале нового дома в 1990 г. Объемная активность радона в 2,5 раза превышала национальный контрольный уровень для радона [132]. Для нормализации радоновой ситуации собственником была установлена система воздухообмена,

соединяющая подвальный этаж с выводом на крыше дома. Последовательные измерения радона начались в 1992 г. и продолжались 17 лет, их целью была оценка надежности активных защитных систем. Измерения показали, что на протяжении всего периода исследований система функционировала должным образом, снизив первоначальную концентрацию радона с 370 ± 8 , 56 ± 1 и 67 ± 1 Бк/м³ для подвала, первого и второго этажей, соответственно, до средней величины 19 ± 4 , 13 ± 3 и $10 \pm 0,1$ Бк/м³, соответственно.

На фоне реализуемых в США национальных и других радоновых программ, требующих значительного финансирования, широкий общественный резонанс вызвали исследования радиобиолога Коэна, показавшие отрицательную зависимость между уровнями радона в жилищах и риском возникновения рака легкого [118], противоречащую современным представлениям о вреде бытового радона. При этом автором были размещены в открытом доступе использованные статистические данные и выполненные им расчеты, которые до сих пор полностью не опровергнуты другими исследователями.

Неоднозначность восприятия радоновой проблемы в США, не в последнюю очередь, обусловлена и целебными свойствами радона. В полиметаллических шахтах Монтаны в 20-х годах прошлого века велась добыча цветных металлов (по большей части — серебра), в середине века в их тоннелях были установлены крайне высокие уровни радиации, вызванные наличием урана, и эксплуатация шахт прекратилась. В настоящее время некоторые из этих шахт используются для лечения целого ряда заболеваний посредством радонотерапии.

В Мексике масштабы радоновых исследований невелики, что можно объяснить скромными финансовыми возможностями данного государства, а также более теплым климатом. В сравнительном эксперименте уровни радона на 288 обследованных рабочих местах оказались существенно ниже, чем в жилых помещениях той же территории, но при этом ни те, ни другие не превышали национальный контрольный уровень [124].

В Азиатском регионе также большинство государств успешно реализует национальные программы по борьбе с радоном. Так, в Японии выполнен мониторинг уровней радона в 705 служебных помещениях, разбитых на четыре категории (школа, офис, больница и фабрика). Полученные результаты показали низкую радоноопасность

территории: средняя по объектам измерения объемная активность радона составила 21 Бк/м^3 , тогда как в жилых помещениях она равна 16 Бк/м^3 в среднем по стране [171].

В последнее десятилетие в Японии было проведено третье радонное общенациональное исследование, призванное оценить динамику изменения уровней радона в жилищах в связи с изменением технологий строительства. В 47 префектурах страны было выбрано 3 900 домов, в которых выполнено 3 461 измерение ОА радона, доля железобетонных и бетонных блочных конструкций составила 32,4 %, что соответствует структуре жилищного фонда. Среднее геометрическое концентрации радона после введения поправки на сезонные колебания составило $14,3 \pm 2,1 \text{ Бк/м}^3$. Было установлено, что только 0,1 % жилищ превышают эталонный уровень ВОЗ для радона в помещении, равный 100 Бк/м^3 . Наиболее высокие концентрации радона отмечены в домах, построенных в середине 1980-х годов [199].

Напротив, повышенные концентрации радона обнаружены в Сянгане (Гонконг), хотя большинство районов города построены на привозном грунте, под которым нет урановых месторождений. Более того, высокие концентрации радона здесь обнаружены не только в помещениях нижних, но и верхних этажей. Основным источником радона являются материалы ограждающих конструкций зданий по причине высокой радиоактивности строительных материалов из-за повышенного содержания ^{226}Ra в них.

В Корее в рамках национальной программы было выполнено обследование 1 100 жилых помещений, в ходе которого определена средняя геометрическая ОА, составившая для радона $49,0 \pm 1,9 \text{ Бк/м}^3$, для торона — $10,7 \pm 2,9 \text{ Бк/м}^3$, при этом уровни радона в частных домостроениях были значительно выше, чем в квартирах. Средние мощности эффективных доз облучения для радона и торона составили 1,65 и 0,17 мЗв/год соответственно, также обнаружена корреляция значений ОА в воздухе помещений с содержанием их материнских радионуклидов в почве [151].

В КНР уже более 10 лет действует национальная радоновая программа, масштабные исследования уровней радона проводятся не только в жилье и на рабочих местах, но и в подземных сооружениях, где концентрации радона традиционно высоки. Так, измерения, выполненные ядерным детектором, размещенным в гранитном тоннеле, показали ОА радона в $10\,000 \text{ Бк/м}^3$ в летнее время [134].

Постоянно измерения радона производятся в социально значимых объектах: при обследовании 376 пекинских школ диапазон концентраций радона составил $18,1-2\ 810$ Бк/м³, а годовая эффективная доза была оценена в интервале $0,0902-8,92$ мЗв/год с учетом времени пребывания учеников учебном заведении [155].

Также системные исследования проводятся в районах Янцзяна, хорошо известных высоким фоновым излучением. Их результаты показывают, что, хотя данные районы расположены между экватором и тропиком Рака и люди живут в хорошо проветриваемых жилищах, концентрации радона и торона значительно выше в воздухе помещений данных территорий, чем в среднем по Китаю [206].

В Ливане были выполнены исследования удельной активности (Бк/кг) радионуклидов ²³⁸U, ²²⁶Ra, ²¹⁴Bi, ²³²Th, ²¹²Pb и ⁴⁰K, содержащихся в 28 видах гранитов, используемых для внутренней отделки помещений [152]. Концентрация радионуклидов ²²⁶Ra, ²³²Th и ⁴⁰K в гранитах варьировалась: от уровня обнаружения до 494 Бк/кг; от уровня обнаружения до 157,2 Бк/кг и от уровня обнаружения до 1776 Бк/кг, соответственно. Эквивалентная удельная активность ²²⁶Ra $C_{\text{Ra}_{\text{eq}}}$ находилась в интервале 37...591 Бк/кг, что выше допустимого предела в 370 Бк/кг. Также были определены коэффициенты диффузии D для 23 типов гранитов, их значения оказались в диапазоне от $(0,1 \pm 0,02) \cdot 10^{-6}$ до $(6,6 \pm 1,01) \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Измерения радона и торона в зданиях Кувейта проводились в течение двух лет, для чего было отобрано 65 жилищ для долгосрочного обследования с использованием пассивных мониторов ядерных треков, которые устанавливались в различных местах в жилищах на срок от 83 до 306 дней. Результаты показали, что диапазон концентраций торона был от предела обнаружения до 35 Бк/м³, тогда как диапазон концентраций радона находился в пределах 10–202 Бк/м³. При этом 22 % результатов по радону превысили эталонный уровень радона ВОЗ, равный 100 Бк/м³ [142].

В районе Пунч Пакистана исследования 80 гостиных и спален на протяжении 3 месяцев зафиксировали изменения объемной активности радона от 27 до 196 Бк/м³ в гостиных и от 27 до 191 Бк/м³ в спальнях, с мощностью эквивалентной дозы от ДПР радона в интервале от 0,78 до 4,00 мЗв/год [183]. В аналогичном исследовании 80 школ Азад Кашмира (Пакистан) детекторы на протяжении 90 дней размещались на высоте 0,9–1,5 м в зависимости от среднего роста учеников, средняя объемная активность радона составила

78 ± 5 Бк/м³, при этом МЭД от облучения радоном и его ДПР равнялась $0,63 \pm 0,04$ мЗв/год [182].

Вариации уровней радона в 110 домах штата Кералы (Индия) составили от 7 до 83 Бк/м³ для радона и от 4 до 86 Бк/м³ для торона, в 50 % жилых помещений концентрация радона не превышала 25 Бк/м³ [174]. В жилых помещениях Пенджаба и Химачал Прадеш среднегодовая ОА радона изменялась в пределах 114–400 Бк/м³ со средней величиной 194 Бк/м³, при этом 22 % жилых помещений по величине ОА находились в интервале 200–300 Бк/м³, а в 11 % помещений концентрация радона превышала 300 Бк/м³ [185]. Среднегодовая эффективная доза составила 4,88 мЗв, а ее максимальные значения наблюдались в плохо проветриваемых помещениях.

В Бангалоре (Индия) с целью изучения суточных вариаций радона было проведено 500 измерений в 20 жилых помещениях утром, днем и ночью два раза в месяц на протяжении года на высоте 1 м от пола [96]. Среднегодовая объемная активность составила $25,4 \pm 1,54$ Бк/м³: $42,6 \pm 2,05$ утром; $15,3 \pm 2,18$ Бк/м³ днем и $28,5 \pm 2,2$ Бк/м³ ночью. При таких значениях ОА радона относительный риск рака легкого составляет $1,19 \cdot 10^{-5}$, а годовая эффективная доза — 0,66 мЗв/год. Там же исследование влияния вентиляции и типа конструкции пола в 200 жилищах различных архитектурных типов показали среднее геометрическое уровней радона и торона $32,2 \pm 1,6$ и $21,4 \pm 1,0$ Бк/м³ соответственно, что не представляет значимого радиационного риска [189]. В Индийских Гималаях измерения в жилых домах проводились при помощи парного дозиметра радона, регистрирующего отдельно радон, торон и их ДПР. Значение ОА радона изменялось от 11 до 191 Бк/м³, торона — от 1 до 156 Бк/м³, коэффициент равновесия между радоном и ДПР находился в интервале от 0,02 до 0,90 со средней величиной 0,26 [184].

Концентрация радона в помещениях штата Карнатака (Индия) варьировалась от 30,72 до 196,08 Бк/м³ с медианой 83,13 Бк/м³, а концентрация торона лежала в интервале от 15,56 до 227,78 Бк/м³. Повышенные концентрации радона и его ДПР наблюдались в гранитных и цементных кровельных зданиях по сравнению с другими типами жилья, что объясняется более высоким содержанием радия в материалах ограждающих конструкций [169].

В Палестине сезонные изменения уровней радона в жилых помещениях проводились в течение всего лета и зимы с использованием детекторов CR-39, число исследованных зданий составило

75 летом и 81 зимой. Концентрации радона летом менялись от 43 до 192 Бк/м³ для зданий в провинции Рамаллы и от 30 до 655 Бк/м³ для Восточных Иерусалимских пригородов. Зимой данные уровни концентраций радона составили 38...375 Бк/м³ и 35...984 Бк/м³ соответственно, при этом средние значения объемной активности в обоих случаях не превышали уровни, рекомендуемые международными организациями [94; 156].

Хотя традиционно считается, что облучение дочерними продуктами распада радона в зданиях — это проблема территорий с умеренным и холодным климатом, в ряде стран африканского континента также ведутся работы по оценке степени радоноопасности жилищного фонда. Так, при исследовании жилых помещений в Александрии (Египет) на протяжении года среднегодовая объемная активность составила 65 ± 10 Бк/м³, а МЭД от облучения ДПР радона — 1,10 мЗв/год. Концентрации радона в зимнее время в 1,54–2,50 раза превышали концентрации в тех же помещениях в теплый период года [90].

В штате Ойо на юго-западе Нигерии в результате полугодовых исследований уровней радона в спальнях и гостиных 77 домов средние значения ОА составили 259 ± 67 и 255 ± 47 Бк/м³ соответственно, а годовая доза облучения — 6,5 и 6,4 мЗв соответственно, что соответствует риску возникновения рака легкого, равному $2,52 \cdot 10^{-5}$ и $2,48 \cdot 10^{-5}$ соответственно. Достаточно высокие урони радона в жилье объясняются геофизическими особенностями данной территории [170].

Из анализа публикаций зарубежных исследователей видно, что в большинстве стран радон, как главный источник облучения населения, признается общенациональной проблемой. Существенные усилия направлены на снижение коллективной дозы облучения населения, для чего большинством стран разработаны и реализуются национальные стратегии. В общем случае государственная противорадовая политика включает следующие этапы:

- измерение уровней радона в зданиях с целью выявления территорий с повышенной радоноопасностью;
- информирование населения о действии радона на человека и простейших способах защиты от него;
- изучение закономерностей поступления радона в здания и сооружения с целью эффективного противодействия переносу радона из грунта в воздух помещения;

- разработка технологий строительства и строительных материалов, эффективно препятствующих поступлению радона в здания;
- разработка нормативных документов, направленных на повышение уровня радоновой безопасности строящихся и эксплуатируемых зданий и сооружений.

2.2. Исследования уровней радона в зданиях на территории Российской Федерации и постсоветских государств

Первые системные исследования уровней радона в жилье на территории современной Российской Федерации относятся к середине 80-х годов XX века, ними были охвачены наиболее радоноопасные регионы страны — Алтай и Северный Кавказ. В это же время проводились работы по оценке доз облучения горняков радоном и его короткоживущих ДПР на неурановых рудниках и карьерах Новгородской, Мурманской, Читинской, Челябинской областей, Республики Коми, в Кузбассе [61].

Со временем география радоновых исследований расширялась, постепенно охватывая регионы, не относящиеся к потенциально радоноопасным. В настоящее время исследования радоноопасности жилищного фонда выполнены во всех без исключения регионах России. Данные о структуре облучения естественными источниками ионизирующего излучения для каждого из регионов РФ систематизированы коллективом Санкт-Петербургского Научно-исследовательского института радиационной гигиены им. Профессора П. В. Рамзаева в [61].

Наиболее изученной в плане уровней радона в зданиях, что вполне закономерно, является территория г. Москва. Здесь уже около 25 лет функционирует многоуровневая система обеспечения радиационной безопасности населения, основными задачами которой является радиационно-экологический мониторинг городской среды, оценка источников радиоактивного облучения населения, контроль соблюдения требований нормативных документов в сфере радиационной безопасности и многое другое [57]. Помимо этого, измерения уровней радона также выполняют лаборатории высших учебных заведений и научно-исследовательских институтов различной ведомственной подчиненности.

Рогалис В. С. и др., исследовавшие уровни радона в воздухе московских помещений, отмечают, что у 6 % жителей первого этажа облучение за счёт радона квалифицируется как повышенное, а среднее расчётное число дополнительных случаев рака легкого, индуцированных радоном, составляет 242 случая в год [60].

Польский О. Г. и др. по результатам мониторинга радоновой ситуации в жилых и служебных помещениях Москвы установили, что среднегодовое значение ЭРОА в воздухе помещений составляет 20,0 Бк/м³, а в атмосферном воздухе 4–5 Бк/м³; в 68 % обследованных помещений доза облучения людей не превышает 2 мЗв/год, в 30 % обследованных помещений доза облучения составляют от 2 до 5 мЗв/год, и только в 2 % доза облучения превышает 5 мЗв/год [57]. Также авторами выполнено 893 измерения концентрации ЭРОА радона на 160 станциях и 83 переходах Московского метрополитена, при этом уровни радона составили: 5–11 Бк/м³ для вестибюлей и платформ, а также переходов, 5–14 Бк/м³ — для тоннелей и перегонов.

Радоновые исследования на территории Брянской области чаще всего ведутся параллельно с оценкой загрязнения от аварии на Чернобыльской АЭС, которому подвергся 21 из 28 районов области. Изучение структуры годовой дозы облучения населения Брянской области, выполненное Пархоменко В. И. и др. показало, что средняя дозовая нагрузка на 1 жителя области от различных источников ионизирующего излучения составляет 3,45 мЗв/год, в том числе: за счет природных источников излучения — 2,74 мЗв/год (79,45 %), за счет медицинских рентгено-радиологических исследований — 0,43 мЗв/год (12,43 %), за счет аварии на ЧАЭС — 0,27 мЗв/год (8,10 %) [56].

В табл. 2.2 представлены доза и процентный вклад облучения радоном и его дочерними продуктами распада в общую дозу облучения населения субъектов Центрального федерального округа природными источниками излучения в коммунальных условиях.

Характерной особенностью Центрального федерального округа является равнинный или близкий к нему характер подстилающей поверхности, вследствие чего вся территория округа считается потенциально нерадоноопасной. Но даже в таких условиях вклад радона в общую дозу облучения естественными радионуклидами почти для всех областей превышает 50 %, из чего можно сделать вывод, что абсолютно нерадоноопасных территорий не существует.

Таблица 2.2 — Средняя годовая индивидуальная эффективная доза облучения радоном и его ДПР населения Центрального федерального округа [61]

Субъект Центрального федерального округа	ЭРОА _{ср} , Бк/м ³	Доза Rn и его ДПР, мЗв/год	Вклад в облучение ЕРН, %
Белгородская область	26,8	1,89	57,83
Брянская область	14,9	1,10	40,91
Владимирская область	18,7	1,35	51,63
Воронежская область	15,7	1,15	47,17
Ивановская область	46,8	3,32	72,59
Калужская область	39,3	2,72	67,26
Костромская область	18,2	1,32	54,34
Курская область	22,6	1,61	50,00
Липецкая область	34,5	2,40	66,65
Московская область	24,2	1,72	57,91
Орловская область	21,7	1,55	53,58
Рязанская область	25,0	1,77	56,21
Смоленская область	18,2	1,32	48,39
Тамбовская область	22,0	1,57	54,76
Тверская область	16,7	1,22	47,47
Тульская область	21,4	1,71	53,82
Ярославская область	27,4	1,93	61,37
г. Москва	21,4	1,53	51,36

Территория Южного федерального округа достаточно неоднородна: около 2/3 занимают равнины (Калмыкия, Астраханская, Волгоградская и Ростовская области, часть Кубани и Адыгеи), еще треть приходится на предгорья и горы. При этом на территории округа отсутствуют ярко выраженные радиационные аномалии.

В Волгограде на протяжении последних десяти лет ведутся работы по изучению радиационных характеристик сырья для производства строительных материалов. В работах Сидельниковой О. П. и др. показана принципиальная возможность управления радиационным качеством строительной продукции путем исключения или ограничения в ней доли сырья и материалов с эффективной удельной активностью, превышающей радиационные критерии [64–66]. Также авторами получено частотное распределение строительных материалов Волгоградской области по эффективной удельной активности и исследована удельная эффективная активность готовых строительных изделий и сырьевого материала, используемых в Волгоградской области.

В Ростовской области в целях оценки вредного воздействия радиационного излучения на население проводится работа по радиационно-гигиенической паспортизации организаций и территории в целом [75]. Данная процедура позволяет не только оценить дозовую нагрузку на население, но и обоснованно рекомендовать первоочередные мероприятия по ограничению его облучения. В рамках паспортизации установлено, что по-прежнему наибольший вклад в коллективную дозу облучения населения вносят природные источники ионизирующего излучения (радон, внешнее гамма-излучение, космическое излучение, пищевые продукты и питьевая вода, ^{40}K , содержащийся в организме человека): на их долю приходится от 92 до 96 % от общей годовой индивидуальной дозы облучения населения области.

В табл. 2.3 представлены доза и процентный вклад облучения радоном и его дочерними продуктами распада в общую дозу облучения населения субъектов Южного федерального округа природными источниками излучения в коммунальных условиях.

Таблица 2.3 – Средняя годовая индивидуальная эффективная доза облучения радоном и его ДПР населения Южного федерального округа [61]

Субъект Южного федерального округа	ЭРОА _{ср} , Бк/м ³	Доза R _п и его ДПР, мЗв/год	Вклад в облучение ЕРН, %
Республика Адыгея	36,3	2,51	65,57
Республика Калмыкия	37,3	2,59	68,75
Краснодарский край	25,9	1,83	57,67
Астраханская область	12,8	0,96	43,88
Волгоградская область	26,5	1,87	61,47
Ростовская область	41,8	2,89	68,66
Республика Крым	19,0	1,37	51,02
г. Севастополь	19,0	1,37	51,37

Санкт-Петербург, наряду с Москвой, является одним из наиболее изученных городов в вопросах радиационной нагрузки на население. Контроль доз облучения населения одновременно осуществляет целый ряд организаций, центров и институтов,

масштабные исследования проводят Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены им. профессора П. В. Рамзаева, научно-исследовательский институт промышленной и морской медицины и т. д.

В Санкт-Петербурге, при среднем значении ЭРОА радона в воздухе жилых зданий города около 21 Бк/м^3 , имеют место территории с повышенным уровнем радиации (Красносельский и Пушкинский районы), где концентрация радона в воздухе помещений достаточно высока [39]. Это объясняется выходом на поверхность этих районов залежей диктионемовых сланцев — горных пород, содержащих уран в концентрации, в 10–100 раз превышающей среднемировую.

В последнее время в Санкт-Петербурге активно ведутся обследования школ, детских садов и других социально значимых объектов на предмет повышенного содержания радона в воздухе помещений. Так, реализация комплекса радонозащитных мероприятий специалистами ФБУН «Научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П. В. Рамзаева» в школе-интернате № 289 Красносельского района Санкт-Петербурга позволила снизить уровень ЭРОА радона в 2,1 раза (с 231 до $109,6 \text{ Бк/м}^3$), что в долгосрочной перспективе может привести к уменьшению количества радон-индуцированных случаев смерти от рака легкого на популяционном уровне на 2,2–2,4 % для всего населения [38].

Подобная работа проводится и в Вологодской области, где было обследовано 105 помещений в 23 зданиях детских общеобразовательных учреждений (ДОУ) в городах Великий Устюг и Красавино [76]. Максимальные концентрации радона были обнаружены в подвальных помещениях (657 Бк/м^3), помещениях первого (331 Бк/м^3) и второго (160 Бк/м^3) этажей, что однозначно указывает на «почвенный» путь радона из геологического пространства под зданием.

В табл. 2.4 представлены доза и процентный вклад облучения радоном и его дочерними продуктами распада в общую дозу облучения населения субъектов Северо-Западного федерального округа природными источниками излучения в коммунальных условиях.

В табл. 2.5 представлены доза и процентный вклад облучения радоном и его дочерними продуктами распада в общую дозу облучения населения субъектов Дальневосточного федерального округа природными источниками излучения в коммунальных условиях.

Таблица 2.4 – Средняя годовая индивидуальная эффективная доза облучения радоном и его ДПР населения Северо-Западного федерального округа [61]

Субъект Северо-Западного федерального округа	ЭРО _{А,ср} , Бк/м ³	Доза R _п и его ДПР, мЗв/год	Вклад в облучение ЕРН, %
Республика Карелия	27,7	1,95	60,92
Республика Коми	14,2	1,05	43,90
Архангельская область	15,8	1,16	49,34
Вологодская область	26,8	1,89	58,62
Калининградская область	23,9	1,70	56,05
Ленинградская область	21,5	1,54	49,65
Мурманская область	22,7	1,62	53,96
Новгородская область	23,6	1,68	51,87
Псковская область	25,6	1,81	57,03
г. Санкт-Петербург	24,4	1,73	54,80
Ненецкий автономный округ	10,0	0,77	34,38

Таблица 2.5 – Средняя годовая индивидуальная эффективная доза облучения радоном и его ДПР населения Дальневосточного федерального округа [61]

Субъект Дальневосточного федерального округа	ЭРО- _{А,ср} , Бк/м ³	Доза R _п и его ДПР, мЗв/год	Вклад в облучение ЕРН, %
Республика Саха (Якутия)	29,3	2,06	58,96
Приморский край	26,0	1,84	56,05
Хабаровский край	29,0	2,04	57,58
Амурская область	32,5	2,27	57,27
Камчатский край	11,8	0,89	41,61
Магаданская область	34,1	2,75	67,97
Сахалинская область	14,6	1,08	46,49
Еврейская автономная область	77,7	5,28	77,57
Чукотский автономный округ	13,7	1,02	42,17

Как видно из табл. 2.5, для Еврейской автономной области проблема радоновой безопасности жилья стоит крайне остро. Формирование радиационной обстановки определяется особенностями геологического строения: в пределах ЕАО расположены многочисленные массивы горных пород с высокими (вплоть до промышленных) концентрациями урана и большим количеством аномалий радона. Активной миграции и накоплению радона в зданиях также способствует весьма напряженная сейсмогеодинамика [36]. Исследованиями Клинской Е. О. и др. показано, что наиболее высокий уровень радона в воздухе помещений имеет место в Биробиджанском районе, в столице автономии — Биробиджане и, особенно, в Облученском районе, где среднегодовые значения ЭРОА превышают контрольный уровень в 1,7 раза.

Институтом тектоники и геофизики ДВО РАН совместно с комбинатом «Радон» составлены карты радононосности Хабаровского края и города, дана оценка исследуемых территорий по степени радоноопасности. Территория г. Хабаровска по результатам этих работ, в целом, отнесена к умеренно опасной [2]. В дальнейшем с целью уточнения степени радоноопасности зданий Хабаровска Андреевым А. И. и др. производилось изучение закономерностей поступления радона в служебные помещения трех высших учебных заведений [1; 3]. Авторы наблюдали увеличение ЭРОА в летние месяцы с максимумом в июле, также периодически фиксировался «залповый» механизм поступления радона, вызванный действием сейсмогеодинамических факторов. Для более точной оценки уровней радона в зданиях при небольшом количестве измерений авторы рекомендуют проводить исследования в период установления высокого атмосферного давления.

В табл. 2.6 представлены доза и процентный вклад облучения радоном и его дочерними продуктами распада в общую дозу облучения населения субъектов Сибирского федерального округа природными источниками излучения в коммунальных условиях.

Как видно из табл. 2.6, повышенная доза облучения (от 5 до 10 мЗв/год) характерна для населения Республики Тыва, Забайкальского края и, особенно, Республики Алтай, а значения ЭРОА радона в воздухе помещений Республики Алтай являются наибольшими по всей территории РФ. Кроме этого, исследованиями Кормановской Т. А. и др. выявлены отдельные группы населения, дозы облучения которых значительно превышают средние

по регионам; а для отдельных представителей этих групп превышение достигает десятков и сотен раз [40].

Таблица 2.6 — Средняя годовая индивидуальная эффективная доза облучения радоном и его ДПР населения Сибирского федерального округа [61]

Субъект Сибирского федерального округа	ЭРОА _{ср} , Бк/м ³	Доза Rп и его ДПР, мЗв/год	Вклад в облучение ЕРН, %
Республика Бурятия	45,1	3,11	67,76
Республика Алтай	115,0	7,76	85,14
Республика Тыва	66,2	4,51	78,52
Республика Хакасия	23,8	1,69	54,96
Алтайский край	38,1	2,64	66,02
Красноярский край	26,0	1,90	59,49
Иркутская область	52,0	3,57	68,84
Кемеровская область	39,9	2,76	65,28
Новосибирская область	35,7	2,48	63,88
Омская область	32,0	2,24	61,17
Томская область	21,4	1,53	53,91
Забайкальский край	81,3	5,52	74,57

В Иркутской области выявлен ряд регионов с повышенной радоноопасностью, где в условиях горных разработок имеет место разрушение рельефа, приводящее к наслоению на естественный радоновый фон региона антропогенного загрязнения радоном жилых помещений [52]. В результате обследования 820 жилых объектов Прибайкалья, проведенных Ненаховой Е. В. и др. данные объекты по величине объемной активности радона распределились следующим образом: 0–100 Бк/м³ — 56 % квартир, 100–200 Бк/м³ — 26 % квартир, 200–1000 Бк/м³ — 17 % квартир, более 1000 Бк/м³ — 1 % квартир. Для подвергшихся наибольшей дозовой нагрузке жильцов 8 квартир рассчитанная годовая доза превысила значение 15 мЗв/год.

Изучение характера изменения объемной активности радона по высоте в атмосфере и помещениях выполнено Яковлевой В. С. и др. в Томске [85]. Авторами получена отличающаяся от традиционных представлений зависимость ОА радона от высоты над земной поверхностью: с ростом высоты до 25 м объемная активность возрастает в несколько раз, и далее до 35 м остается практически постоянной. Объяснением такой особенности поведения радона

авторы считают влияние городской инфраструктуры. Также они отмечают необходимость учитывать увеличение ОА радона с высотой и при моделировании уровней радона внутри помещений многоэтажных зданий, поскольку, проветривание помещений может приводить не к снижению уровней радона, согласно традиционным представлениям, а к их увеличению.

Измерения уровней радона, выполненные Торосяном В. Ф. и др. в г. Юрга Томской области показали, что в зимний период содержание радона в жилых и служебных помещениях максимально и превышает допустимое в 2,5 раза. Главной причиной данной ситуации авторы полагают отсутствие в помещениях должного проветривания [74].

В Республике Тыва Хагалыгом А. А. и др. выполнено исследование уровней радона и их сезонных вариаций в частном жилье сельских районов [77]. Четырехэтапное проведение измерений активности радона в Монгун-Тайгинском районе (в июле, в августе, в октябре, в ноябре) выявило значительное (до 80 %) расхождение в значениях мгновенной ЭРОА при максимальной объемной активности радона 932 ± 158 Бк/м³ и наибольших значениях ЭРОА радона в летний период.

В табл. 2.7 представлены доза и процентный вклад облучения радоном и его дочерними продуктами распада в общую дозу облучения населения субъектов Уральского федерального округа природными источниками излучения в коммунальных условиях.

Свердловская область является наиболее изученным регионом УФО, что связано с деятельностью Института промышленной экологии УрО РАН. Только в рамках специальных радоновых обследований проведены измерения концентрации радона более чем в 2,5 тыс. жилых зданий, в самом Екатеринбурге измерения охватили 404 квартиры в многоэтажных домах [12, 86], объекты исследования в Екатеринбурге группировались по годам постройки (до и после 2001 года).

Основная часть измерений в объектах, возведенных до 2001 года, проводилась в квартирах кирпичных (~40 %) и панельных (~52 %) многоквартирных домов, среднее арифметическое значение ЭРОА радона в жилищах Екатеринбурга составило 38 Бк/м³, среднее геометрическое — 29 Бк/м³, что соответствует среднему общемировому значению в 40 Бк/м³. По результатам обследования 57 квартир в современных многоэтажных домах было найдено

среднее арифметическое значение концентрации радона в выборке 83 Бк/м³ и среднее геометрическое — 62 Бк/м³. Двукратное превышение уровней радона в современных зданиях авторы объясняют повышением герметичности внутреннего объема помещений.

Васильевым А. В. и др. проведено радоновое обследование 511 жилищ в 14 сельских населенных пунктах на территории Челябинской и Курганской областей, расположенных на реке Теча, пострадавшей в результате сброса жидких радиоактивных отходов с ПО «Маяк» в середине прошлого века [13]. В процессе измерений установлено, что средняя активность радона в жилых помещениях составляет 150 Бк/м³, что обуславливает годовую эффективную дозу облучения 11 мЗв. Результаты измерений позволяют предположить, что норматив ЭРОА радона 200 Бк/м³ превышен в 5 % жилых домов.

Еще одной масштабной экологической проблемой Урала является наличие Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС), образованного в результате аварии на ПО «Маяк» в конце сентября 1957 г., вследствие которой радиоактивному загрязнению подверглись обширные территории Челябинской и Свердловской областей. Ярмошенко И. В. и др. оценен радиационный ущерб здоровью населения северной части ВУРС, обусловленный проживанием на радиоактивно загрязненной территории по результатам анализа продолжительности жизни 9,5 тыс. человек, проживавших в сельских населенных пунктах северной части ВУРСа, чья смерть наступила в период 1963–2000 гг. [87]. Величина данного радиационного ущерба, нормированная на дополнительную коллективную дозу, составила $12,3 \pm 5,9$ и $6,6 \pm 5,9$ лет/Гр для мужчин и женщин, соответственно, с тенденцией снижения этого параметра с возрастом при облучении.

Наряду с прикладными изысканиями, коллективом ИПЭ УрО РАН выполняется ряд фундаментальных исследований, направленных на расширение знаний о физике процесса поступления радона в здания, таких как определение соотношения между диффузионным и конвективным потоками радона (доминирующего механизма поступления), оценка кратности воздухообмена в помещении и т. д.

Исследования радиационной обстановки в г. Чебаркуль (Челябинской области), проведенные Машковой И. В. и др., показали, что ЭРОА радона в зданиях из дерева были много выше, чем в постройках других типов [46]. Хотя сама древесина и не является

источником радона, но она не способна оказывать значимое сопротивление поступлению радона из грунта.

Таблица 2.7 — Средняя годовая индивидуальная эффективная доза облучения радоном и его ДПР населения Уральского федерального округа [61]

Субъект Уральского федерального округа	ЭРОА _{ср} , Бк/м ³	Доза Rn и его ДПР, мЗв/год	Вклад в облучение ЕРН, %
Курганская область	33,6	2,28	64,10
Свердловская область	38,5	2,67	66,67
Тюменская область	12,1	0,91	42,09
Челябинская область	31,9	2,23	58,36
Ханты-Мансийский АО — Югра	21,7	1,55	55,02
Ямало-Ненецкий АО	17,8	1,29	49,27

В табл. 2.8 представлены доза и процентный вклад облучения радоном и его дочерними продуктами распада в общую дозу облучения населения субъектов Приволжского федерального округа природными источниками излучения в коммунальных условиях.

Таблица 2.8 — Средняя годовая индивидуальная эффективная доза облучения радоном и его ДПР населения Приволжского федерального округа [61]

Субъект Приволжского федерального округа	ЭРОА _{ср} , Бк/м ³	Доза Rn и его ДПР, мЗв/год	Вклад в облучение ЕРН, %
Республика Башкортостан	33,7	2,35	67,30
Республика Марий-Эл	14,9	1,10	46,99
Республика Мордовия	17,9	1,30	52,08
Республика Татарстан	21,7	1,55	54,64
Удмуртская Республика	18,1	1,31	51,03
Чувашская Республика	29,2	2,05	61,43
Кировская область	25,0	1,77	58,44
Нижегородская область	26,0	1,84	56,01
Оренбургская область	34,5	2,40	64,21
Пензенская область	19,0	1,37	49,98
Пермский край	27,2	1,92	58,70
Самарская область	26,0	1,84	59,22
Саратовская область	22,4	1,60	55,06
Ульяновская область	14,5	1,07	46,12

В Оренбурге на протяжении трех лет производились измерения уровней радона в воздухе закрытых помещений, средние значения ЭРОА радона составили: 91,8 Бк/м³ — для подвальных помещений, 64,7 Бк/м³ — на первых этажах, 53,5 Бк/м³ — на вторых этажах, 47,6 Бк/м³ — на третьих этажах, 51,4 Бк/м³ — на четвертых этажах, 44,7 Бк/м³ — на пятых этажах [11]. Кроме того, авторами исследовались подходы к нормализации радоновой обстановки в здании: бетонирование земляного пола снизило ЭРОА радона в подвальном помещении с 1 700 до 230 Бк/м³, а двукратный воздухообмен уменьшал объемную активность радона в 5–10 раз.

В табл. 2.9 представлены доза и процентный вклад облучения радоном и его дочерними продуктами распада в общую дозу облучения населения субъектов Северо-Кавказского федерального округа природными источниками излучения в коммунальных условиях.

Таблица 2.9 — Средняя годовая индивидуальная эффективная доза облучения радоном и его ДПР населения Северо-Кавказского федерального округа [61]

Субъект Северо-Кавказского федерального округа	ЭРОА _{ср} , Бк/м ³	Доза Rn и его ДПР, мЗв/год	Вклад в облучение ЕРН, %
Республика Дагестан	23,5	1,67	58,33
Республика Ингушетия	38,7	3,09	69,75
Кабардино-Балкарская Республика	38,7	3,09	73,50
Карачаево-Черкесская Республика	44,2	3,05	68,99
Республика Северная Осетия — Алания	37,8	2,62	66,77
Чеченская Республика	16,0	1,17	46,19
Ставропольский край	57,6	3,94	72,21

Из табл. 2.9 видно, что наибольшую дозу облучения от дочерних продуктов радона получают жители Ставропольского края, на территории которого сосредоточены места добычи урана и целый ряд радоновых аномалий, по большей части — в районе Кавказских Минеральных Вод. Еще одной особенностью формирования радиационной обстановки в районе КМВ является его расположение на высоте 500–1070 м, что приводит к интенсивности космического

излучения в 1,5–2 раза выше, чем для городов на равнинной местности [67]. Наряду с этим, геологические особенности территорий городов-курортов приводят к формированию повышенного гамма-фона территорий и интенсивному радоновыделению с поверхности грунтов.

К настоящему времени специалистами Северо-Кавказского федерального и Волгоградского государственного технического университетов изучены основные источники радиационной нагрузки на население района КМВ. Установлено, что основным фактором, влияющим на радиационную обстановку региона, а следовательно, и уровни облучения населения, является природная радиоактивность горных пород [68, 150]. К примеру, эксхалация радона с поверхности грунта на территории г. Лермонтов в среднем составляет 250 мБк/(м²·с), а на отдельных участках достигает значений 4 500 мБк/(м²·с) при среднемировых значениях 18 мБк/(м²·с). В работах Сидякина П. А. и др. показано, что уровень облучения населения региона КМВ за счет радона существенно не меняется и составляет 6,3–7,4 мЗв/год [68]. Для сравнения, данная величина для населения Ставрополя лежит в пределах 0,8–0,9 мЗв/год.

Еще одним направлением изысканий, выполняемых в настоящее время рядом научных центров, академических институтов и вузов на территории региона КМВ, является исследование радоновой аномалии горы Бештау, на которой ранее осуществлялась добыча урана. Вследствие выноса на поверхность радиоактивных элементов шахтными водами значения удельной активности урана и радия в донных отложениях у входа в штольню достигают 216 000 Бк/кг и более 1 000 Бк/кг, соответственно, что позволяет классифицировать их как радиоактивные отходы, которые представляют серьезную радиационную угрозу [50].

Обобщая данные табл. 2.2–2.9, можно оценить средние по федеральным округам уровни радона в зданиях и дозы внутреннего облучения от дочерних продуктов распада радона (табл. 2.10).

Полученные в табл. 2.10 результаты достаточно условны, поскольку уровни радона в зданиях испытывают значительные суточные и сезонные вариации, а увеличение числа обследованных объектов ведет к уточнению средних по регионам значений. В то же время, они позволяют получить качественное представление о дозах, формируемых радоном у населения конкретной территории. Здания Сибирского и Северо-Кавказского федеральных

округов являются наиболее радоноопасными в России, что объясняется расположением на их территории обширных радоновых аномалий — Республики Алтай и Кавказских Минеральных Вод, соответственно.

Таблица 2.10 — Средние по федеральным округам значения радиационных характеристик облучения населения

Федеральный округ	ЭРОА _{ср} , Бк/м ³	Доза Rn и его ДПР, мЗв/год	Вклад в облучение ЕРН, %
Центральный ФО	24,2	1,73	55,2
Южный ФО	27,3	1,92	58,5
Северо-Западный ФО	21,5	1,54	51,9
Дальневосточный ФО	29,9	2,14	56,2
Сибирский ФО	48,0	3,31	66,6
Уральский ФО	25,9	1,82	55,9
Поволжский ФО	23,5	1,68	55,8
Северо-Кавказский ФО	36,6	2,66	65,1

Радоновые исследования также ведутся и на территории постсоветских государств, наибольший объем изысканий выполнен в республиках Беларусь и Украина, где они зачастую проводятся в контексте оценки загрязнения территорий продуктами аварии на Чернобыльской АЭС.

Как отмечает Мирончик А. Ф., населению Республики Беларусь присуща твердая уверенность в том, что главным источником радиоактивного облучения организма являются радионуклиды Чернобыльского происхождения, хотя на самом деле радон и его ДПР формируют от 50 до 75 % годовой индивидуальной эквивалентной дозы облучения, получаемой населением [51].

Исследованиями Чеховского А. Л. и др. установлено, что средние значения ЭРОА по районам Гомельской области находятся в интервале 17–29 Бк/м³, а уровни более 100 Бк/м³ отмечены в 2,9 % обследованных жилых зданий [79, 80]. Средние значения ЭРОА по районам Могилевской области составляют 22–73 Бк/м³, более высокие значения ЭРОА радона характерны для северных районов: Шкловского (73 Бк/м³) и Горецкого (65 Бк/м³), при этом значения ЭРОА радона более 100 Бк/м³ отмечены в 12,2 % обследованных жилых зданий, а ЭРОА радона более 200 Бк/м³ определяются почти в 3 % жилых зданий. Средние значения ЭРОА по районам Витебской области составляют 22–76 Бк/м³, высокие значения ЭРОА

радона регистрируются по всей территории области: Глубокский (67 Бк/м³), Россонский (54 Бк/м³), Толочинский (60 Бк/ м³), Шумилинский (51 Бк/ м³), и особенно Шарковщинский (76 Бк/ м³) район. Значения ЭРОА радона более 100 Бк/м³ отмечены в 14,8 % обследованных жилых зданий, более 200 Бк/м³ ЭРОА радона определяются почти в 3,8 % жилых зданий.

В работах Чунихина Л. А. и др. предложен принципиально новый подход к картированию территории по радоновой опасности с использованием геологических показателей, определяющих концентрации радона. Подобный подход позволяет выделить наиболее радоноопасные зоны и предложить необходимые противорадоновые мероприятия [54; 81–82]. Использование предложенного показателя позволяет определить географическое положение критических зон радоноопасности и составить тематические карты этих территорий по радоновому риску, что крайне важно в случае недостатка ресурсов для проведения полномасштабных исследований, как это имеет место в Беларуси.

В Украине повышенные величины среднегодовой эффективной дозы облучения населения отмечены в Днепропетровской, Кировоградской, Житомирской, Черкасской, Запорожской, Херсонской, Тернопольской, Николаевской, Луганской и Одесской областях [37, 173]. В Кировоградской области есть районы концентрациями радона в помещениях зданий от 20 000 до 50 000 Бк/м³.

В г. Желтые Воды Днепропетровской области объемная активность радона в атмосферном воздухе изменяется от 217 до 364 Бк/м³, в городах Вольногорск и Желтые Воды концентрация радона в помещениях отдельных зданий достигает 6 000–10 000 Бк/м³. Наиболее радоноопасные восточные районы г. Желтые Воды, в которых размещены в основном дома частного сектора, характеризуются повышенным уровнем онкозаболеваний населения [44]. В атмосферу г. Днепродзержинск Днепропетровской области из хвостохранилища отходов уранового производства ПО «Приднепровский химический завод» ежегодно попадает $2,13 \cdot 10^{13}$ Бк радона и 23,9 тонн радиоактивной пыли со средней удельной активностью 3,7 кБк/кг. В ряде регионов Украины обнаружены здания, где в квартирах, расположенных выше первого этажа, зафиксированы концентрации радона 200–300 Бк/м³.

Большие эффективные дозы получают некоторые жители на территориях, пострадавших от Чернобыльской аварии:

Житомирская обл. — 5 мЗв/год и Киевская обл. — 4,6 мЗв/год. Для критических групп населения максимальные значения эффективных доз характерны для Житомирской (5,6 мЗв/год), Черкасской (5,5), Тернопольской (7,4), Николаевской (6,3) и Ивано-Франковской (6,2) областей. Повышенные значения дозы облучения наблюдаются в городах: Херсон (7,6 мЗв/год), Тернополь (7,4), Черкассы (7), Винница (5,4), Одесса (5,1), Желтые Воды (4,8), Вольногорск (4,6) и Днепро-дзержинск (3,8 мЗв/год).

Главной проблемой обеспечения радоновой безопасности зданий является тот факт, что на большей части территории Украины контроль содержания радона не осуществляется, карт радоноопасности практически нет, а необходимый объем полного обследования жилищ далек до завершения. Наибольший объем исследований и радонозащитных мероприятий выполнен в областных центрах, в регионах проводились только выборочные измерения [29].

В Азербайджане впервые проведены системные измерения уровней радона в помещениях, концентрации радона в объектах исследования изменялись практически от нуля до $1\ 100\ \text{Бк}/\text{м}^3$, при этом только порядка 7 % от общего количества измерений превысили допустимый национальный уровень [133]. Составленные в результате карты распределения повышенных концентраций радона в помещениях достаточно точно повторяют контуры сейсмически активных районов на пересечении активного разлома Западного Каспия с субширотными разломами вдоль Большого и Малого Кавказа и Тальшских гор.

Комплексный радиационный мониторинг уровней радона в помещениях нижних этажей сельских домов и городских квартир Киргизии не выявил статистически значимых различий в среднегодовых значениях эквивалентной равновесной объемной активности [70].

Анализ результатов измерений ЭРОА радона в воздухе жилых и служебных помещений г. Чкаловск (Таджикистан) показал, что концентрация радона-222 в воздухе обследуемых помещений находятся в пределах $18\text{--}46\ \text{Бк}/\text{м}^3$, что ниже установленного для эксплуатируемых зданий предела в $200\ \text{Бк}/\text{м}^3$ [10].

Подводя итоги анализа состояния радоновой проблемы в России и в мире, следует отметить, что радон практически во всем мире воспринимается как реальная угроза коллективному здоровью населения. В то же время, радоновая проблема может быть решена,

то есть уровни радона в помещениях практически любой территории могут быть снижены до приемлемой величины за счет использования современных технологий строительства и применения строительных материалов с соответствующими радонозащитными характеристиками. Но для разработки таких технологий и материалов необходимо проведение фундаментальных исследований радонной проблемы, которые бы позволили идентифицировать все факторы, определяющие перенос радона с момента его образования в грунте и до момента поступления в воздух помещения.

ГЛАВА 3

Исследование закономерностей переноса радона в пористой среде

3.1. Критерии и признаки радоноопасности

Рост числа исследований, посвященных радоновой тематике, привел к утверждению в научной литературе новых терминов, смысл которых зачастую не сформулирован однозначно. Ниже нами предложены определения наиболее часто употребляемых понятий.

Радоноопасность — заключенная в объекте возможность нанесения ущерба здоровью человека вследствие избыточного воздействия на него радона [36]. Чаще всего данный термин употребляется по отношению к определенной географической территории или участку застройки, что не совсем корректно. Человек, находящийся на данной территории не получает ущерба здоровью от радона в атмосферном и почвенном воздухе. На наш взгляд, корректнее говорить исключительно о радоноопасности зданий.

Исходя из приведенного выше определения, можно сформулировать противоположный ему по смыслу термин *радоновая безопасность* — состояние объекта, при котором с определенной вероятностью исключается нанесение вреда здоровью человека от избыточного воздействия на его организм радона. Данное состояние может быть достигнуто за счет реализации *противорадоновой защиты* — технических мероприятий, направленных на снижение содержания радона в воздухе помещения.

Для количественной оценки соответствия радоновой обстановки в здании установленным (нормативным) требованиям в разных странах используют различные *критерии радоноопасности*. В России и странах постсоветского пространства в качестве такого критерия принята величина эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) изотопов радона в воздухе помещений. В большинстве зарубежных стран используется более доступная для

инструментального контроля величина объемной активности (ОА) радона. Принятие этих критериев связано с установленной зависимостью дозы облучения от уровня ЭРОА (или ОА) радона в помещении и продолжительности облучения.

Нормами радиационной безопасности РФ (НРБ-99/2009) установлено максимальное допустимое значение среднегодовой ЭРОА дочерних продуктов радона и торона во внутреннем воздухе современных зданий — 100 Бк/м^3 [53]. Однако данный уровень с позиции безопасности не является оптимальным, он определен с учетом реальных современных технических и экономических возможностей России.

В соответствии с принятыми международным сообществом принципами защиты населения от облучения следует стремиться к максимальному, социально и экономически обоснованному снижению концентрации радона в помещении. Согласно рекомендациям Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ), цель противорадиационных мероприятий должна заключаться в поддержании концентрации радона в построенном здании на таком низком уровне, какой только может быть разумно достигнут [58]. В 1988 г. Конгресс США утвердил долгосрочную национальную цель — облучение населения радоном в зданиях на территории страны не должно превышать облучения на открытом воздухе.

Величина ЭРОА дочерних продуктов радона в воздухе помещений является критерием потенциальной радоноопасности существующих зданий на данной территории. Но для строящихся зданий ее измерение попросту невозможно, поэтому [53] в качестве характеристики радоноопасности участка застройки установлена предельная величина плотности потока радона (ППР) с поверхности грунта $80 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. При превышении данного значения участок классифицируется как потенциально радоноопасный с необходимостью реализации противорадиационной защиты здания, при непревышении указанной величины необходимость радонозащитных мероприятий определяется специалистами санитарно-эпидемиологической службы.

В отличие от критериев, *признаки радоноопасности* могут служить лишь элементом ориентировки при сравнительной оценке объектов, это различного рода показатели, косвенно свидетельствующие о вероятности создания избыточной концентрации радона в здании. К признакам радоноопасности следует отнести:

- повышенную объемную активность радона в эксплуатируемом здании, расположенном вблизи предполагаемой площадки строительства нового здания;
- повышенную объемную активность радона в почвенном газе на территории застройки;
- повышенную плотность потока радона из грунта на территории застройки;
- наличие в геологическом разрезе территории необводненных грунтов, представленных трещиноватыми породами-коллекторами или породами, для которых характерны высокие концентрации и (или) вариабельность концентрации радия-226;
- расположение площади застройки в зоне активной текущей микрогеодинамики;
- повышенный уровень гамма-фона на открытой территории в районе участка застройки;
- использование в проекте здания подземных конструкций, которым свойственен низкий уровень радонозащитной способности (отсутствие монолитного фундамента, наличие незагерметизированных швов в направлении переноса радона).

Данные о наличии или отсутствии признаков радоноопасности следует принимать во внимание на предпроектной стадии строительства (стадии инвестиционной подготовки), а также учитывать при определении содержания и объема радиационно-геологических изысканий на площади планируемой застройки, проводимых на стадии разработки проекта.

3.2. Общие закономерности переноса радона в пористой среде

Радон не образуется непосредственно в воздухе помещений, он поступает в них извне. Поэтому для формирования неблагоприятной радоновой обстановки в помещении необходимо одновременное выполнение следующих условий:

- наличие в окрестности здания источников образования радона;
- наличие путей проникновения радона в здание;
- наличие движущих сил, обеспечивающих поступления радона в здание по указанным маршрутам.

Основными источниками поступления радона в здания являются грунт под зданием, материалы его ограждающих конструкций и атмосферный воздух, поступающий в здание посредством инфильтрации. В редких случаях значимым может оказаться поступление радона с водой и природным газом, но в условиях централизованного газо- и водоснабжения мощностью этих источников следует пренебречь.

Нормирование удельной эффективной активности $A_{эфф}$ сырья для строительного производства позволяет ограничить выделение радона из ограждающих конструкций здания. Обычно поток радона с поверхности ограждающей конструкции не превышает 2–3 мБк/(м²·с), что составляет порядка 7–10 % от общего поступления радона. Практически весь радон поступает в помещениях нижнего этажа с почвенным воздухом из грунтового основания здания через подземную оболочку здания.

Интенсивность поступления радона в здание зависит от его концентрации во внутрипоровом воздухе грунта на внешней границе подземной горизонтальной ограждающей конструкции. Для определения этой концентрации необходим учет всех основных процессов образования, переноса и распада радона. При составлении математической формулировки задачи переноса радона в слое пористого материала смесь радона с воздухом удобно представить в виде двухкомпонентного газа (бинарной смеси) с пренебрежимо малым содержанием одного из компонентов, свойства которого не зависят от температуры. Тогда молярный перенос компонента A (радона) бинарной смеси через элементарный слой материала может быть выражен уравнением

$$M_{Rn} = N_{Rn} \cdot (M_{Rn} + M_g) - c \cdot D_0 \cdot \frac{\partial N_{Rn}}{\partial x}, \quad (3.1)$$

где M_{Rn} и M_g — плотность потоков радона и воздуха, соответственно, моль/(м²·с); N_{Rn} — молярная доля радона в почвенном воздухе; c — молярная концентрация смеси, моль/м³; D_0 — объемный коэффициент диффузии радона в материале слоя, м²/с.

Первое слагаемое в (3.1) представляет конвективный поток радона, а второе — диффузионный. В первом слагаемом следует пренебречь членом $N_{Rn} \cdot M_{Rn}$ ввиду его малости. Например, при

объемной активности радона в почвенном воздухе $40\,000\text{ Бк/м}^3$, характерной для грунтов со средним содержанием радия, молярная доля радона при $20\text{ }^\circ\text{C}$ составляет всего $7,6 \cdot 10^{-16}$. Тогда, считая молярную концентрацию воздуха постоянной, из (3.1) получаем

$$M_{Rn} = N_{Rn} \cdot M - D_0 \cdot \frac{\partial(c \cdot N_{Rn})}{\partial x} = N_{Rn} \cdot M - D_0 \cdot \frac{\partial c_{Rn}}{\partial x}, \quad (3.2)$$

где M — плотность потока почвенного воздуха, моль/ $(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, c_{Rn} — молярная концентрация радона, моль/ м^3 .

Радон относится к наименее распространенным на Земле элементам, в атмосфере его содержится всего около $2,4\text{ кг}$, что составляет около $5 \cdot 10^{-17}\%$ его массовой концентрации. Из-за невозможности инструментальной регистрации современными приборами столь малых масс вместо массовой концентрации используют прямо пропорциональную ей и доступную для измерения объемную активность радона. Переходя от количества вещества к единицам активности, получаем выражение для плотности потока радона q_{Rn} , Бк/ $(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

$$q_{Rn} = A_{Rn} \cdot v - D_0 \cdot \frac{\partial A_{Rn}}{\partial x}, \quad (3.3)$$

где A_{Rn} — объемная активность радона, Бк/ м^3 ; v — скорость конвективного потока воздуха, м/с.

Свободный радон, выделившийся в поровое пространство, смешивается с воздухом и другими почвенными газами. Активность свободного радона, отнесенная к единице объема грунта, называется *объемной активностью радона в грунте*, а отнесенная к единице объема порового пространства — *объемной активностью радона в почвенном газе*.

Первое слагаемое в (3.3) представляет собой закон Дарси, описывающий конвективный поток радона через слой пористого материала и может быть записано через градиент давлений

$$q_{кон} = \frac{A_{Rn} \cdot k}{\varepsilon \cdot \eta} \cdot \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (3.4)$$

где k — воздухопроницаемость материала, м^2 ; η — динамическая вязкость почвенного воздуха, $\text{Па}\cdot\text{с}$; P — давление, Па .

Второе слагаемое в (3.3) описывает диффузионный поток радона в пористой среде и представляет собой закон Фика в одномерной постановке. Его величина может быть скорректирована путем замены бинарного коэффициента диффузии D_0 на эффективный коэффициент диффузии $D_{эфф}$, учитывающий влияние на перенос радона материала и структуры скелета материала слоя или «эквивалентный» коэффициент диффузии $D_э$, учитывающий еще и вклад термо- и бародиффузионных эффектов в процесс молекулярной диффузии. Скорректированная плотность диффузионного потока радона в пористой среде имеет вид

$$q_{\text{офф}} = -D_э \cdot \frac{\partial A_{Rn}}{\partial x}, \quad (3.5)$$

а исследование вида коэффициента диффузии радона $D_э$ выполнено в п. 3.3 данной главы. Знак «минус» в (3.5) показывает, что диффузионных перенос радона реализуется в направлении снижения его объемной активности.

При написании (3.5) были приняты следующие допущения:

1. В почвенном воздухе все взаимодействия атомов радона происходят с молекулами воздуха — допущение справедливо, если размеры пор велики по сравнению с длиной свободного пробега атомов радона, составляющей 0,5–0,7 мкм. Для более мелких пор имеет место процесс диффузии Кнудсена.

2. Весь содержащийся в слое радон находится в поровом пространстве — обоснованность данного допущения будет показана ниже.

На основании (3.5) можно составить уравнение диффузионного переноса радона через слой сухого материала

$$\frac{\partial A_{Rn}}{\partial t} = D_э \cdot \frac{\partial^2 A_{Rn}}{\partial x^2} - \lambda \cdot A_{Rn} + G, \quad (3.6)$$

где $\lambda = 2,09 \cdot 10^{-6} \text{с}^{-1}$ — постоянная распада радона; G — объемная мощность источников радона в грунте, $\text{Бк}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$.

Любой грунт в той или иной степени содержит уран и, как следствие, радий, представляя собой среду с внутренним распределенным постоянным источником радона. Образующийся в породе радон частично поступает в поровое пространство и частично задерживается в кристаллической решетке породообразующих минералов.

Отношение количества атомов радона, попадающих в поровое пространство материала и способных к миграции внутри материала (свободных), к общему количеству атомов радона, образующихся в твердой фазе материала, называют *коэффициентом эманирования* $k_{эм}$. Значения коэффициента эманирования радона в грунтах и строительных материалах находится в диапазоне от 0,05 до 0,7 в зависимости от их минералогического состава, размера и формы твердых частиц, пористости и характера пор, влагосодержания и т. д.

Объемная мощность G данного вещества или материала как источника радона описывается формулой

$$G = C_{Ra} \cdot k_{эм} \cdot \rho_{сп} \cdot \lambda \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon}, \quad (3.7)$$

где C_{Ra} — удельная активность радия-226 в грунте, Бк/кг; ε — пористость грунта; $\rho_{сп}$ — плотность грунта, кг/м³.

Величина удельной активности радия в грунте C_{Ra} зависит только от массового содержания радия в твердой фазе и может варьировать в пределах от единиц до сотен Бк/кг, она практически не меняется во времени и легко поддается измерению методами гамма-спектроскопии. Среднемировое содержание радия в грунтах составляет 29,7 Бк/кг, при этом в грунтах с низким содержанием радия оно не превышает 15 Бк/кг, а в грунтах со средним содержанием радия — 50 Бк/кг.

Объемную активность (концентрацию) радона в смеси газов, заполняющих поровое пространство грунта, определяют экспериментально или расчетным путем. При изменении температуры и влагосодержания грунта и прочих равных условиях эта концентрация может изменяться в несколько раз. В табл. 3.1 представлены средние значения объемной активности радона в почвенном газе на глубине 1 м, экстремальные значения могут превышать приведенные в несколько раз.

Таблица 3.1 — Объемная активность радона в почвенном газе на глубине 1 м

Тип грунта	Объемная активность радона, Бк/м ³
Песок, мелкий песок, суглинок	2 000–20 000
Морена обычная	5 000–30 000
Глина	10 000–60 000
Гравий, насыпные материалы	10 000–150 000
Морена с гранитом	10 000–200 000
Морена с квасцами и сланцами	50 000–1 000 000

Объединяя выражения (3.4) — (3.7), получаем уравнение конвективно-диффузионного переноса радона через слой пористого вещества

$$\frac{\partial A_{Rn}}{\partial t} = D_3 \cdot \frac{\partial^2 A_{Rn}}{\partial x^2} + \frac{k}{\varepsilon \cdot \eta} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \cdot \frac{\partial A_{Rn}}{\partial x} - \lambda \cdot A_{Rn} + G. \quad (3.8)$$

Уравнение (3.8), полученное при ряде упрощающих допущений, не учитывает действия всех факторов, влияющих на перенос радона в пористой среде. Но даже в таком виде его аналитическое решение чрезвычайно сложно и вряд ли может быть использовано для получения обобщающей характеристики радонозащитной способности материала.

Основными факторами, определяющими процесс переноса радона в среде или материале, являются толщина слоя материала δ , время t , перепад давлений ΔP и перепад температур ΔT на границах материала. Поскольку в процессе лабораторных экспериментов плотность потока радона поддается инструментальному контролю, то задача сводится к определению функции

$$q_{Rn} = f(t, \delta, \Delta P, \Delta T). \quad (3.9)$$

В (3.9) величина q_{Rn} представляет собой суммарный поток радона на внешней границе пористого материала ($x = \delta$), вызванный действием всех видов переноса.

3.3. Плотность потока радона как критерий радоноопасности территорий застройки

Плотность потока радона (ППР) из грунта в качестве критерия оценки радоноопасности площади застройки впервые была введена в 1996 г. в Московских городских строительных нормах [66], а в 2000 г. данная величина была включена в ОСПОРБ-99, тем самым приобретая статус санитарно-гигиенического норматива.

Введение нового критерия было обусловлено тем, что ППР достовернее, чем использовавшаяся ранее величина объемной активности радона в почвенном воздухе, характеризует радоновую нагрузку на подземные ограждающие конструкции здания. Второй причиной утверждения ППР стала возможность проведения ее массовых измерений в натуральных условиях.

Согласно [55], участок застройки классифицируется как радоноопасный, если среднее значение ППР из грунта превышает $80 \text{ Бк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Данное пороговое значение было определено из обратного решения уравнения радонового баланса «эталонного дома», в котором эквивалентная равновесная объемная активность радона составляет $100 \text{ Бк}/\text{м}^3$. При решении данного уравнения были приняты следующие допущения:

- весь выделяющийся из грунта радон (в пределах площади застройки) поступает в здание;
- грунтовое основание здания является единственным источником поступающего в него радона;
- коэффициент сдвига равновесия между радоном и его дочерними продуктами распада в здании равен 0,5.

Ввиду того, что плотность потока радона из грунта не является дозообразующим фактором, а представляет всего лишь один из целого ряда факторов, позволяющих судить об ожидаемом значении ЭРОА радона в помещениях будущего здания, корректность ее использования потребовала экспериментальной проверки, которая выполнялась в лаборатории радиационной безопасности в строительстве НИИ Стройфизики РААСН.

На первом этапе исследований производилась общая оценка потенциальной радоноопасности территории Москва в соответствии с установленным предельным значением величины ППР. На протяжении двух лет лабораторией радиационной безопасности в строительстве НИИСФ на территории Москвы были выполнены

измерения плотностей потоков радона на участках строительства 667 зданий. Измерения на каждом участке проводились не менее чем в 20 контрольных точках во все периоды года, частотное распределение средних арифметических $ППР_{ср}$ и расчетных $ППР_{расч}$ значений плотностей потоков радона показано на рис. 3.1.

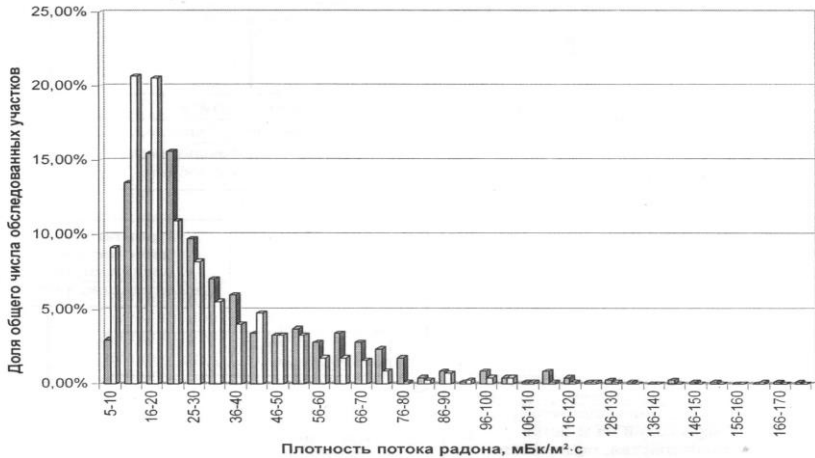


Рисунок 3.1 — Частотное распределение средних арифметических (светлые колонки) и расчетных (темные колонки) значений плотностей потоков радона из грунта на территории г. Москвы

Расчетное для участка значение потока радона определялось по формуле

$$ППР_{расч} = ППР_{ср} \cdot (1 + 2\delta),$$

где δ — среднее квадратическое отклонение частных значений ППР от среднего значения.

Долевое соотношение числа участков с различными диапазонами $ППР_{ср}$ и $ППР_{расч}$ показано на рис. 3.2. Как видно из данного рисунка, превышение установленного критерия радоноопасности отмечено на 6 % участков застройки. Несмотря на неравномерность распределения обследованных участков по территории Москвы, сопоставление данных о потоках радона с характерными геологическими разрезами позволяет предположить, что при дальнейшем увеличении числа обследованных участков и более

равномерном обследовании территории эта доля вряд ли изменится более чем на 1–2 %.

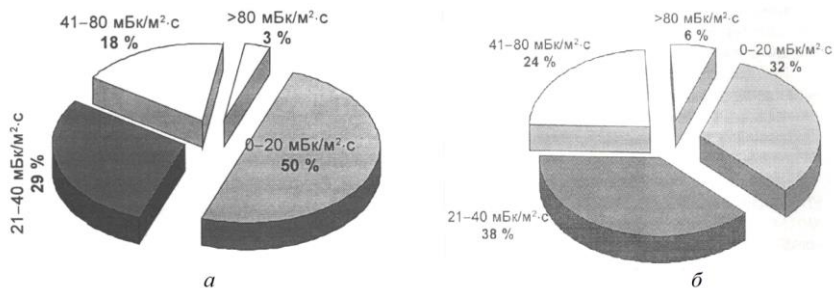


Рисунок 3.2 — Долевое соотношение числа участков (в %): а — с различными средними арифметическими значениями потоков радона из грунта; б — с различными расчетными арифметическими значениями потоков радона из грунта

Проведенные на первом этапе изыскания показали, что в Москве зоны с катастрофически высокими выделениями радона из грунтов отсутствуют, и поэтому применения в строящихся в Москве зданиях наиболее радикальных и дорогих средств противорадоновой защиты не требуется. Учитывая свойства наиболее часто применяемых в Москве конструкций подземной части жилых зданий, обычно достаточно лишь частичное повышение их газонепроницаемости путем применения технических решений, аналогичных устройству гидроизоляции подземных конструкций.

Полученные результаты также позволили сформулировать следующие предположения:

1. В геологических условиях Москвы, где верхние слои литосферы чаще всего сложены из таких осадочных пород как глины, суглинки, супеси и пески, интенсивность выделений радона на поверхности земли в решающей мере определяется характеристиками верхних слоев грунтов, простирающихся на глубину до 15 метров. Наиболее значимыми факторами формирования радоновой обстановки на участке являются: толщина и глубина расположения слоев глин, концентрация радия и коэффициент эманирования радона в этих глинах. Именно для глин зарегистрирован наиболее широкий диапазон варьирования значений удельной активности радия (15–150 Бк/кг) и наиболее высокие абсолютные значения этой

активности. Случаи выхода близко к поверхности земли других пород с подобными активностями радия достаточно редки.

2. На основе обобщения и анализа результатов радоновых изысканий, а также имеющихся геологических данных можно выделить на территории Москвы районы следующих трех категорий: заведомо радонобезопасные, заведомо радоноопасные и районы неопределенные, где геологические условия настолько сложны, что оценка радоноопасности может быть произведена только путем прямых натуральных измерений.

Второй этап исследований носил теоретический характер и был посвящен справедливости первого из приведенных выше допущений, а также принятого в [55] предположения, что плотность потока радона на поверхности грунта несущественно отличается от ППР на отметке заложения фундамента здания.

Очевидно, что радон, выделяющийся на достаточно большой глубине, практически полностью распадается, не успевая достигнуть поверхности земли. В связи с этим, представляет интерес определить толщину (мощность) поверхностных слоев грунта, которые определяют интенсивность выделений радона на отметке поверхности земли. Для краткости будем называть эти слои «активными», а нижерасположенные слои, из которых радон не достигает поверхности земли — «пассивными».

В случае, когда в геологическом разрезе поверхностные слои грунта представлены такими осадочными породами как глина, супесь, песок и т. п., конвективный перенос радона пренебрежимо мал, а его движение в направлении дневной поверхности происходит за счет диффузии и переноса вместе с влагой.

В предположении стационарного характера одномерного диффузионного переноса радона в однородном грунте с равномерно распределенной по объему концентрацией радия (рис. 3.3), с учетом (3.6) и (3.7) получаем

$$D \cdot \frac{\partial^2 A_{Rn}(x)}{\partial x^2} - \lambda \cdot A_{Rn}(x) \cdot \varepsilon + \lambda \cdot \rho_{sp} \cdot C_{Ra} \cdot k_{зм}, \quad (3.9)$$

где $A_{Rn}(x)$ — объемная активность радона в почвенном воздухе, Бк/м³; ε — пористость грунта.

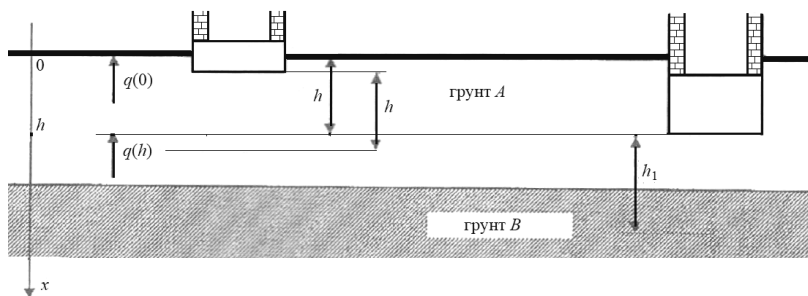


Рисунок 3.3 — Схема расположения «активных» слоев грунта мощностью h и h_1 для слабо- и сильнозаглубленных зданий, соответственно

Решение (3.9) при граничных условиях ($0 \leq x \leq h$)

$$A_{Rn}(0) = 0 \text{ и } -D \cdot \left. \frac{dA}{dx} \right|_{x=h} = q(h),$$

где $q(h)$ — заданное значение плотности потока радона, Бк/(м²·с), имеет вид

$$A_{Rn}(x) = q(h) \cdot \frac{l_0}{D} \cdot \frac{sh \frac{x}{l_0}}{ch \frac{x}{l_0}} + \rho \cdot C_{Ra} \cdot k_{эм} \cdot \left(1 - \frac{ch \frac{x-h}{l_0}}{ch \frac{h}{l_0}} \right), \quad (3.10)$$

где l_0 — длина диффузии радона в грунте (м), определяемая по формуле

$$l_0 = \sqrt{\frac{D}{\lambda \cdot \varepsilon}}.$$

Используя (3.10), получаем общий вид функции распределения плотности потока радона по оси x в виде

$$q(x) = -q(h) \cdot \frac{ch \frac{x}{l_0}}{ch \frac{h}{l_0}} - \frac{D \cdot \rho \cdot C_{Ra} \cdot k_{эм}}{l_0 \cdot \varepsilon} \cdot \left(1 - \frac{sh \frac{h-x}{l_0}}{ch \frac{h}{l_0}} \right), \quad (3.11)$$

где первое слагаемое в правой части определяет составляющую суммарного потока радона, обусловленную заданной величиной плотности потока $q(h)$, а второе — составляющую, обусловленную выделениями радона в «активном» слое грунта мощностью h .

При отсутствии выделений в слое грунта отношение плотности потока радона на уровне поверхности земли ($x = 0$) к плотности потока на глубине h

$$\theta = \frac{q(0)}{q(h)} = \frac{1}{ch(h/l_0)}. \quad (3.12)$$

Принимаем диапазон вариации значений коэффициента диффузии D для осадочных пород от $6 \cdot 10^{-8}$ до $2,45 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ и пористости от 0,20 до 0,35. Зависимость величины θ от толщины слоя грунта h при граничных значениях коэффициента диффузии и пористости показаны на рис. 3.4.

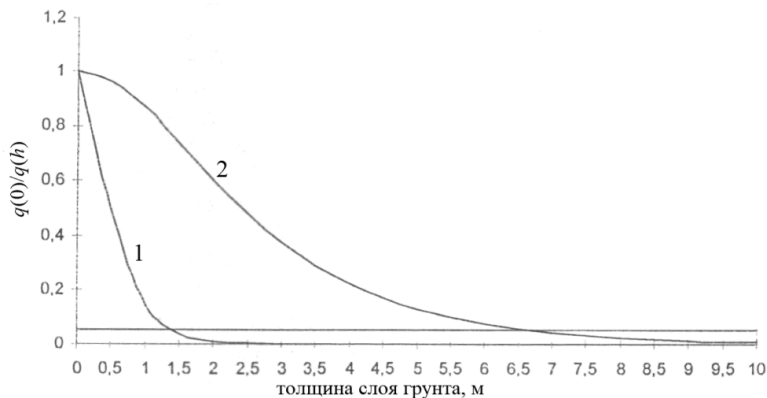


Рисунок 3.4 — Зависимость доли потока радона $q(h)$, достигающей поверхности земли, от мощности слоя грунта: кривая 1 — $D = 6 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ и $\varepsilon = 0,2$; кривая 2 — $D = 2,45 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ и $\varepsilon = 0,35$

Из рис. 3.4 видно, что мощность верхнего слоя грунта, при которой поверхности земли достигает пренебрежимо малая часть потока $q(h)$, составляет от 2,5 до 10 м. Таким образом, плотность потока радона на отметке поверхности земли практически полностью определяется источниками радона в этом слое.

В слабопроницаемых грунтах мощность «активного» слоя может оказаться меньше величины заглубления здания и тогда подошва фундамента здания может опираться на грунты, существенно отличающиеся по свойствам от грунтов «активного» слоя. В результате фактическая радоновая нагрузка на подземную часть здания на отметке заложения подошвы фундамента может существенно отличаться от нагрузки, определенной по результатам измерений ППР на отметке поверхности земли. В связи с этим методика оценки радоноопасности участков застройки по результатам измерений ППР радона на поверхности земли нуждается в уточнении. Очевидно, что более достоверную информацию можно получить при проведении измерений потоков радона на отметке заложения подошвы фундамента.

Решения (3.10) — (3.11) также позволяют сопоставить значения ППР и объемных активностей радона на различных глубинах ($0 \leq x \leq h$) «активного» слоя грунта, распределение этих величин по глубине показано на рис. 3.5.

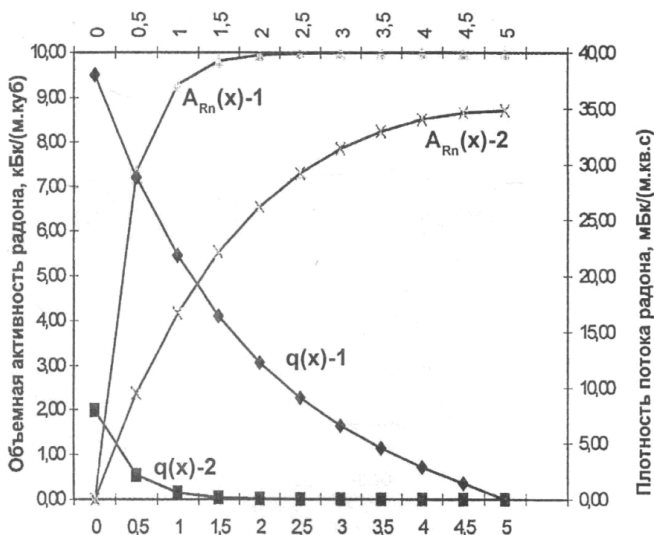


Рисунок 3.5 — Распределения объемной активности и плотности потока радона по глубине при различных значениях коэффициента диффузии радона в грунте: $C_{Ra} = 25$ Бк/кг; $\rho = 2000$ кг/м³; $k_{эм} = 0,2$ и $h = 5$ м. Кривые $A_{Rn}(x)-1$ и $A_{Rn}(x)-1$ при $D = 6 \cdot 10^{-8}$ м²/с, кривые $A_{Rn}(x)-2$ и $A_{Rn}(x)-2$ при $D = 2,45 \cdot 10^{-6}$ м²/с

Из рис. 3.5 видно, что при одних и тех же значениях объемной активности радона в грунте плотности потоков радона существенно различны. Мало того, при более высоких объемных активностях плотности потока могут быть ниже, чем при низких. Закономерности, показанные на рис. 3.4–3.5, соответствуют случаю, когда перенос радона в грунте происходит только за счет диффузии. Реальный процесс характеризуется еще и наличием конвективной составляющей переноса, поэтому мощность «активного» слоя может превышать полученные расчетные значения.

Результаты проведенного численного эксперимента позволяют сделать следующие выводы:

1. Величина ППР из грунта не прямо пропорциональна величине объемной активности радона в грунте. При высокой объемной активности радона в грунте его выделения могут иметь меньшие значения, чем при более низкой.

2. На участках, где верхние слои геологического разреза представлены такими мелкодисперсными осадочными породами как глина, суглинок, супесь, песок и т. п., уровень выделения радона на поверхности земли определяется свойствами достаточно тонкого «активного» слоя грунта. Максимальная мощность такого слоя при действии только диффузионного механизма переноса радона не превышает 10 м.

3. Оценку уровня радоноопасности участка по результатам измерений плотности потока радона на уровне поверхности земли необходимо производить с учетом того, что при подготовке котлована часть верхнего слоя грунта удаляется и активную роль в формировании радоновой нагрузки на подземную часть здания начинают играть более глубокие слои. Необходимость в учете этого обстоятельства отсутствует в тех случаях, когда геологический разрез участка представлен однородными грунтами на глубину, равную сумме заглубления здания и мощности «активного» слоя.

При оценке потенциальной радоноопасности территории по величине ППР с поверхности грунта в соответствии с [55] не учитываются сезонные вариации измеряемой величины. С целью оценки значимости этой вариации и определяющих ее размах факторов *на третьем этапе исследований* на протяжении двух лет производились измерения ППР из грунта на открытой экспериментальной площадке в Москве.

Экспериментальная площадка была расположена на берегу Бутаковского залива Химкинского водохранилища на территории Тушинской метеостанции. Перепад высоты на площадке составлял 5 м, перепад высоты от нижней точки площадки до зеркала воды в заливе в зимний период — около 3,4 м; в летний период — около 1,5 м.

Измерения ППР радона производились сорбционным методом с помощью комплекта аппаратуры «Камера» в 16 рассредоточенных контрольных точках. Схема расположения экспериментальной площадки и датчиков потока радона показаны на рис. 3.6, а геолого-литологический разрез площадки — на рис. 3.7.

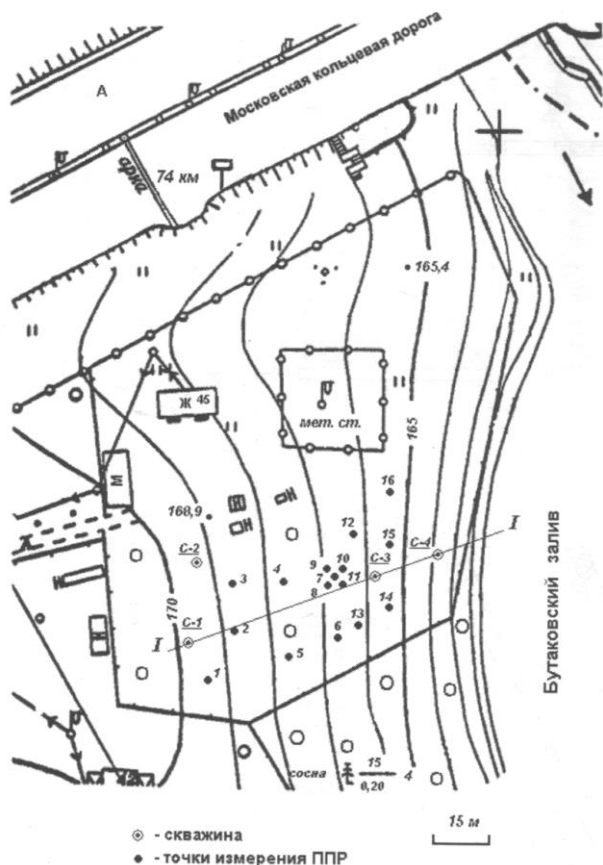


Рисунок 3.6 — Схема расположения экспериментальной площадки и датчиков потока радона

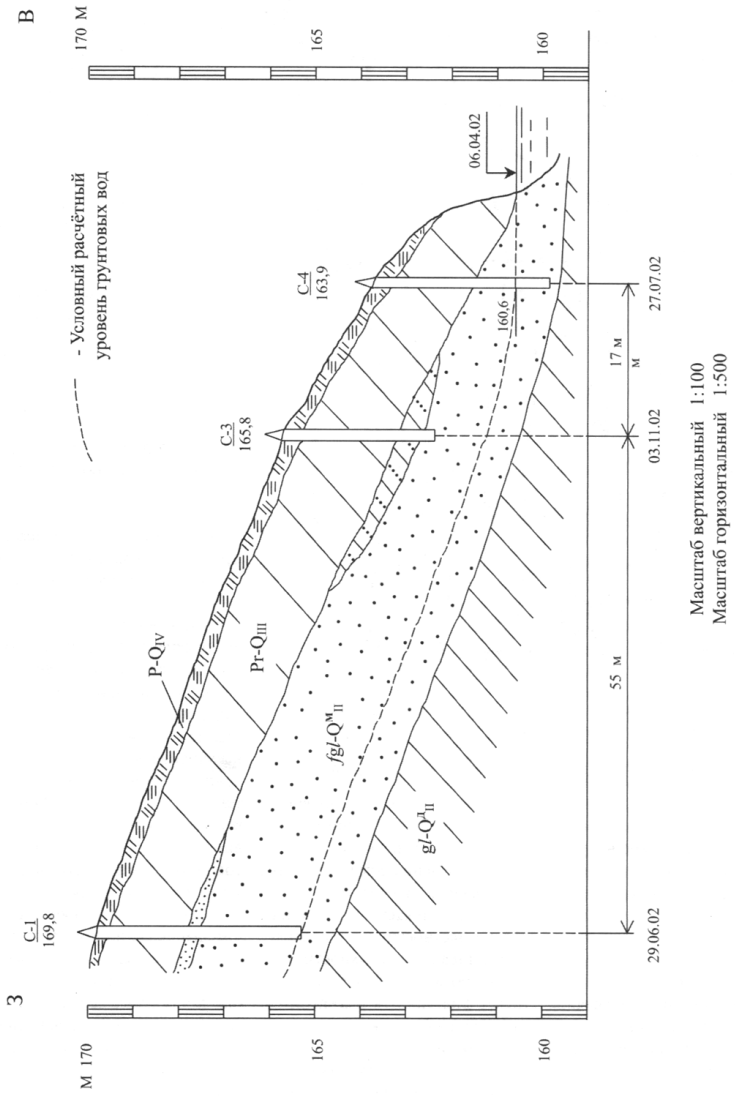


Рисунок 3.7 — Геолого-литологический разрез экспериментальной площадки

Параллельно с измерением потоков радона велась регистрация температуры и влажности наружного воздуха, скорости ветра, интенсивности и продолжительности осадков, атмосферного давления, температуры поверхностного слоя и влажности грунта.

Результаты проведенных измерений (средние арифметические значения плотностей потоков радона в 16 контрольных точках) представлены на рис. 3.8 *а-г*.

Согласно проведенным измерениям среднегодовое значение ППР на экспериментальной площадке составило 45,3 мБк/(м²·с), диапазон вариации в течение года — от 9 до 96 мБк/(м²·с); максимальное и минимальное значение при положительных температурах грунта — 96 и 10 мБк/(м²·с); максимальное и минимальное значение при отрицательных температурах грунта — 81 и 9 мБк/(м²·с); отклонение максимального значения от среднегодового — 50,7 мБк/(м²·с); отклонение максимального значения от среднегодового — 36,3 мБк/(м²·с).

Из рис. 3.8 видно, что на исследованной площади экстремальные значения потоков радона отличаются от среднегодового более чем в два раза.

Обращает на себя внимание ярко выраженное в разные времена года совпадение периодов уменьшения плотности потоков с периодами увлажнения грунта осадками (рис. 3.9), тогда как прямая связь между изменениями значений ППР и изменениями температур в процессе эксперимента не обнаружена.

Можно предположить, что установление зависимостей между количеством радона, выделяемого из грунтов различных типов, и их влажностным состоянием представляет значительный практический интерес, их существование можно объяснить следующими обстоятельствами. Вследствие непрерывного круговорота воды на Земле поверхностные слои литосферы, то насыщаются нею, то теряют ее. Появление почвенных вод («верховодки») обусловлено атмосферными осадками. Почвенные воды залегают у дневной поверхности, пропитывая почвенный слой на небольшую глубину. Грунтовые воды — это воды, покоящиеся на первом от дневной поверхности водоупорном слое.

В общем случае во время и после выпадения дождя (или таяния ранее выпавшего снега) часть воды стекает при наличии уклона местности, часть испаряется с дневной поверхности, часть просачивается в грунт и может фильтроваться до глубины первого

постоянного водоносного горизонта. Таким образом, толщина и вертикальные координаты несущих «верховодку» слоев грунта, а также толщина «активного» слоя в реальных условиях непрерывно изменяются. Соответственно, газопроницаемость этих слоев в течение года изменяется от максимальной (при минимальной влажности грунта), до практически нулевой (при полном влагонасыщении).

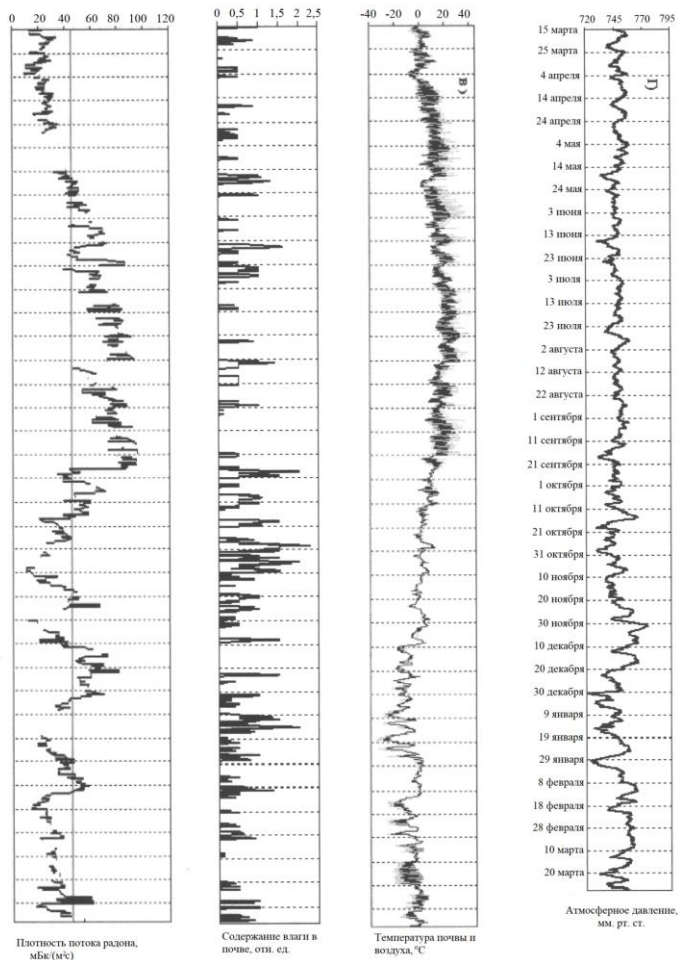


Рисунок 3.8 — Исследование сезонных вариаций: а — плотности потока радона с поверхности грунта; б — содержания влаги в почве; в — температуры почвы и воздуха; г — атмосферного давления

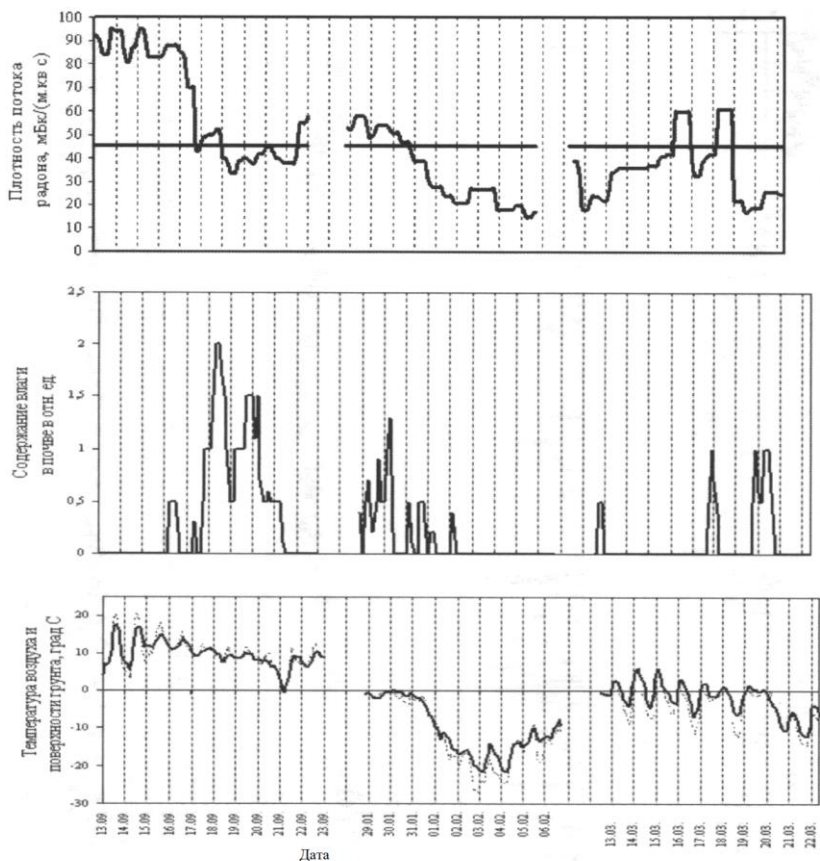


Рисунок 3.9 — Измерение влагосодержания грунта и плотностей потоков радона в различные периоды года

Результаты исследования сезонных закономерностей изменения величины плотности потока радона с поверхности грунта позволяют сделать следующие выводы:

1. Плотность потока радона на уровне дневной поверхности подвержена значительным сезонным изменениям. Поэтому оценка радоноопасности площадей застройки только на основе результатов измерений ППР в произвольные моменты времени представляется недостаточно достоверной.

2. Изменчивость плотностей потоков радона во времени и пространстве на поверхности одного и того же участка территории прежде всего связана с изменением газопроницаемости грунта, обусловленным изменением его температурно-влажностного состояния.

3. При прогнозировании уровней радона в зданиях после их возведения должны учитываться такие факторы как уровень и амплитуда циклического изменения первого постоянного водоносного горизонта грунтовых вод, величина заглубления здания, тип конструкции его подземной части, интенсивность вентиляции подполья и др.

Заключительный этап исследований был посвящен оценке значимости влияния на величину плотности потока радона с поверхности грунта порядка расположения и физических характеристик геологических элементов геолого-литологическом разрезе площади застройки. Результаты измерений $ППР_{ср}$ и $ППР_{расч}$ на шести участках с различной структурой верхних слоев литосферы подтвердили первоначальную гипотезу о значимости исследуемого эффекта (табл. 3.2).

Таблица 3.2 — Плотности потока радона на уровне поверхности земли (числитель) и дне котлована (знаменатель) в г. Москва

Адрес объекта	Основные элементы геологического разреза	Плотность потока радона, мБк/(м ² ·с)	
		$ППР_{ср}$	$ППР_{расч}$
Митино, м/р 1А, корп. 2	песок-глины	63/123	73/133
ул. Мневники, вл. 5	песок-глины	13/127	14/168
Новые Черемушки, кв. 20–21, корп. 24	глина-суглинок-супесь	89/121	114/27
Западное Дегунино, м/р. 13А, корп. 31	суглинок-глина-суглинок	64/10	83/13
ул. Маршала Полубоярова, вл. 22	Песок-супесь	38/37	48/44
ул. 1-я Прядильная, вл. 10	суглинок-песок-супесок	45/46	54/55

Для теоретической оценки отмеченного экспериментально обстоятельства рассматривались закономерности формирования

стационарного радонового режима в одномерном массиве грунта, сформированном двумя однородными слоями с различными характеристиками. Конвективный перенос радона к дневной поверхности не учитывался ввиду отсутствия в реальных породах условий для естественной конвекции. Также не принимался во внимание перенос радона с жидкостью и водяными парами, не получивший на данный момент убедительного экспериментального подтверждения. Таким образом, рассматривался процесс диффузионного переноса радона в двух плоскопараллельных слоях (рис. 3.10), при этом математическая постановка задачи имела следующий вид:

$$D_1 \cdot \frac{d^2 A_1(x)}{dx^2} - \lambda \cdot A_1(x) \cdot \varepsilon_1 + \lambda \cdot \rho_1 \cdot C_{Ra1} \cdot k_{зм1} = 0, \quad (3.13)$$

при $-h_1 \leq x \leq 0$;

$$D_2 \cdot \frac{d^2 A_2(x)}{dx^2} - \lambda \cdot A_2(x) \cdot \varepsilon_2 + \lambda \cdot \rho_2 \cdot C_{Ra2} \cdot k_{зм2} = 0, \quad (3.14)$$

при $0 \leq x \leq h_2$;

$$A_1(-h_1) = A_n, \quad (3.15)$$

$$D_1 \cdot \frac{dA_1(x)}{dx} = D_2 \cdot \frac{dA_2(x)}{dx}, \quad \text{при } x = 0 \quad (3.16)$$

$$A_1(0) = A_2(0), \quad (3.17)$$

$$-D_2 \cdot \frac{dA_2(h_2)}{dx} = q_0, \quad (3.18)$$

где D — эффективный коэффициент диффузии радона в грунте, $\text{м}^2/\text{с}$; A_n и $A_{1,2}$ — активность радона в наружном и почвенном воздухе, соответственно, $\text{Бк}/\text{м}^3$; q_0 — заданное значение плотности потока радона, $\text{Бк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

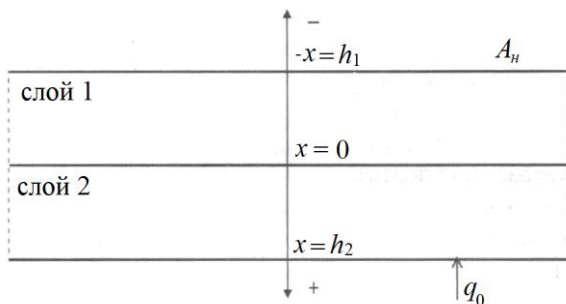


Рисунок 3.10 — Схема к решению краевой задачи (3.13) — (3.18)

Введем условные обозначения:

– длина диффузии радона в грунте

$$L_1 = \sqrt{\frac{D_1}{\lambda \cdot \varepsilon_1}}, \quad L_2 = \sqrt{\frac{D_2}{\lambda \cdot \varepsilon_2}};$$

– поток радона в слое за 1 с

$$Q_1 = \frac{C_{Ra1} \cdot \rho_1 \cdot k_{зм1}}{\varepsilon_1}, \quad Q_2 = \frac{C_{Ra2} \cdot \rho_2 \cdot k_{зм2}}{\varepsilon_2};$$

– вспомогательные величины

$$Y = A_n - Q_1 - (Q_2 - Q_1) \cdot ch \frac{h_1}{L_1}, \quad d = \frac{D_2 \cdot L_1}{D_1 \cdot L_2}.$$

Решение уравнений (3.13) — (3.14) с использованием граничных условий и условных обозначений имеет вид

$$A_1(x) = (Q_2 - Q_1) \cdot ch \left(\frac{x}{L_1} \right) + Y \cdot \frac{ch \left(\frac{h_2}{L_2} \right) \cdot ch \left(\frac{x}{L_1} \right) - d \cdot sh \left(\frac{h_2}{L_2} \right) \cdot sh \left(\frac{x}{L_1} \right)}{ch \left(\frac{h_1}{L_1} \right) \cdot ch \left(\frac{h_2}{L_2} \right) + d \cdot sh \left(\frac{h_1}{L_1} \right) \cdot sh \left(\frac{h_2}{L_2} \right)}$$

$$-q_0 \cdot \frac{L_1}{D_1} \cdot \frac{sh\left(\frac{h_1}{L_1}\right) \cdot ch\left(\frac{x}{L_1}\right) + ch\left(\frac{h_1}{L_1}\right) \cdot sh\left(\frac{x}{L_1}\right)}{ch\left(\frac{h_1}{L_1}\right) \cdot ch\left(\frac{h_2}{L_2}\right) + d \cdot sh\left(\frac{h_1}{L_1}\right) \cdot sh\left(\frac{h_2}{L_2}\right)} + Q_1, \quad -h_1 \leq x \leq 0; \quad (3.19)$$

$$A_2(x) = \frac{Y \cdot ch\left(\frac{h_2-x}{L_2}\right) - q_0 \cdot \frac{L_2}{D_2} \cdot \left[ch\left(\frac{h_1}{L_1}\right) \cdot sh\left(\frac{x}{L_2}\right) + d \cdot sh\left(\frac{h_1}{L_1}\right) \cdot ch\left(\frac{x}{L_2}\right) \right]}{ch\left(\frac{h_1}{L_1}\right) \cdot ch\left(\frac{h_2}{L_2}\right) + d \cdot sh\left(\frac{h_1}{L_1}\right) \cdot sh\left(\frac{h_2}{L_2}\right)} + Q_2,$$

$$0 \leq x \leq h_2; \quad (3.20)$$

$$q_1(x) = -\frac{D_1}{L_1} \cdot \left[(Q_2 - Q_1) \cdot sh\left(\frac{x}{L_1}\right) + Y \cdot \frac{ch\left(\frac{h_2}{L_2}\right) \cdot sh\left(\frac{x}{L_1}\right) - d \cdot sh\left(\frac{h_2}{L_2}\right) \cdot ch\left(\frac{x}{L_1}\right)}{ch\left(\frac{h_1}{L_1}\right) \cdot ch\left(\frac{h_2}{L_2}\right) + d \cdot sh\left(\frac{h_1}{L_1}\right) \cdot sh\left(\frac{h_2}{L_2}\right)} \right] +$$

$$+q_0 \cdot \frac{ch\left(\frac{h_1+x}{L_1}\right)}{ch\left(\frac{h_1}{L_1}\right) \cdot ch\left(\frac{h_2}{L_2}\right) + d \cdot sh\left(\frac{h_1}{L_1}\right) \cdot sh\left(\frac{h_2}{L_2}\right)}, \quad -h_1 \leq x \leq 0; \quad (3.21)$$

$$q_2(x) = \frac{\frac{D_2}{L_2} \cdot Y \cdot sh\left(\frac{h_2-x}{L_2}\right) + q_0 \cdot \left[ch\left(\frac{h_1}{L_1}\right) \cdot ch\left(\frac{x}{L_2}\right) + d \cdot sh\left(\frac{h_1}{L_1}\right) \cdot sh\left(\frac{x}{L_2}\right) \right]}{ch\left(\frac{h_1}{L_1}\right) \cdot ch\left(\frac{h_2}{L_2}\right) + d \cdot sh\left(\frac{h_1}{L_1}\right) \cdot sh\left(\frac{h_2}{L_2}\right)},$$

$$0 \leq x \leq h_2. \quad (3.22)$$

Формула для расчета плотности потока радона, поступающего из верхнего слоя в воздух, имеет вид

$$q_1(x=0) = \frac{D_1}{L_1} \cdot \left[Y \cdot \frac{d \cdot sh\left(\frac{h_2}{L_2}\right)}{ch\left(\frac{h_1}{L_1}\right) \cdot ch\left(\frac{h_2}{L_2}\right) + d \cdot sh\left(\frac{h_1}{L_1}\right) \cdot sh\left(\frac{h_2}{L_2}\right)} \right] +$$

$$+q_0 \cdot \frac{ch\left(\frac{h_1}{L_1}\right)}{ch\left(\frac{h_1}{L_1}\right) \cdot ch\left(\frac{h_2}{L_2}\right) + d \cdot sh\left(\frac{h_1}{L_1}\right) \cdot sh\left(\frac{h_2}{L_2}\right)}, \quad x = 0; \quad (3.21)$$

Положив $h_1 = 0$ и $h_2 = h$, можно получить частные решения системы уравнений (3.13) — (3.18) для одного слоя толщиной h , аналогичные полученным при оценке мощности «активного» слоя грунта.

Ранее в (3.12) было найдено, что отношение плотности потока радона, достигающего дневной поверхности, к плотности потока на глубине h определяется соотношением

$$\frac{q(x=0)}{q(h)} = \frac{1}{ch\left(\frac{h}{L}\right)},$$

из которого можно определить толщину слоя грунта, при которой ППР ослабляется в 100 и 1000 раз (рис. 3.11). Так, положив правую часть равной 0,01 и 0,001, соответственно, получаем значения толщин

$$h_{0,01} = 5,298L \text{ и } h_{0,001} = 7,601L .$$

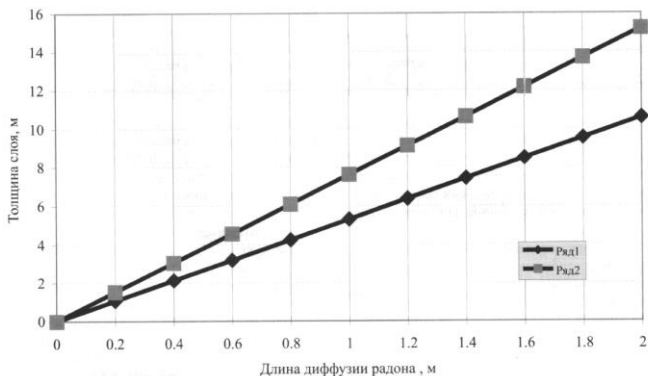


Рисунок 3.11 — Толщина слоя грунта, при которой проходящий через слой поток радона ослабляется в 100 раз (ряд 1) и в 1000 раз (ряд 2) в зависимости от длины диффузии радона

Из рис. 3.11 следует, что при максимальной, реальной для осадочных пород длине диффузии, равной 1,9 м (Приложение 3), достигающий дневной поверхности поток радона формируется в слоях, суммарная толщина которых составляет около 10 м. Исключения возможны лишь при феноменально мощных источниках радона на больших глубинах. При низких и средних значениях длины диффузии толщина активного слоя составляет от 1 до 6 м, что соизмеримо, и даже может быть меньше, чем величина заглублений зданий.

Из сказанного следует вывод, который подтверждается результатами натуральных измерений — при соизмеримом с толщиной «активного» слоя заглублении здания и при неоднородном составе грунтов в «активном» слое плотности потока радона на уровне поверхности земли и на уровне заложения фундамента здания различны.

Для примера на рис. 3.12 показаны рассчитанные по формуле (3.21) закономерности изменения ППР из грунта при различных соотношениях удельной активности радия в двух слоях. Толщина каждого из слоев принята равной 3 м, что соответствует наиболее часто встречающейся величине заглублений зданий с подвалом. Из рис. 3.12 видно, что в зависимости от порядка расположения слоев с низким и высоким содержанием радия плотность потока радона изменяется более чем в два раза.



Рисунок 3.12 — Изменение плотности потока радона из грунта в зависимости от отношения удельной активности радия в верхнем слое к удельной активности радия в нижнем слое ($h_1 = h_2 = 3 \text{ м}$; $k_{эм} = 0,5$; $\rho = 2000 \text{ кг}/\text{м}^3$; $D_{эф} = 7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $L_1 = L_2 = 1,826 \text{ м}$)

На рис. 3.13 показана аналогичная зависимость для различных соотношений длин диффузии радона в верхнем и нижнем слоях. Из нее видно, что при проведении измерений на поверхности земли верхний слой с более низким содержанием радия и газопроницаемостью экранирует выделение радона из нижнего слоя, роль которого становится определяющей после отрывки котлована. Но возможен и обратный случай, когда результаты измерений на поверхности земли приводят к завышенной оценке радоноопасности площади застройки.

Также следует отметить, что при проведении измерений на поверхности земли верхний слой геологического разреза обычно представлен почвами с органическими компонентами или насыпными грунтами техногенного происхождения, характеристики которых существенно отличаются от характеристик коренных пород в основании здания. Более достоверная оценка величины ППР достигается при ее измерении на отметке заложения подошвы фундамента. При этом важно иметь в виду, что целью измерений является не определение величины ППР, а получение ответа на вопрос — необходимы ли при данном проектном решении здания дополнительные меры по его противорадоновой защите. Очевидно, что одна и та же площадь застройки для одной конструкции решения здания может быть «радоноопасной», а для другой — абсолютно безопасной.

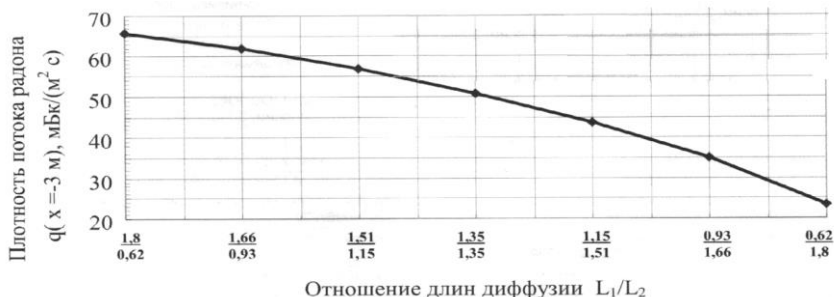


Рисунок 3.13 — Изменение плотности потока радона из грунта в зависимости от отношения длины диффузии радона в верхнем слое к длине диффузии радона в нижнем слое ($h_1 = h_2 = 3$ м; $k_{эм} = 0,5$; $\rho = 2000$ кг/м³; $D_{эфф} = 7 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $C_{Ra1} = C_{Ra2} = 18$ Бк/кг)

Обобщая результаты многолетних исследований закономерностей формирования величины ППР с поверхности грунта и ее вариаций, проведенных лабораторией радиационной безопасности в строительстве НИИСФ РААСН, следует признать, что ее использование в качестве критерия радоноопасности участка застройки имеет целый ряд недостатков:

– *недостоверность* результатов определения ППР — на одном и том же участке застройки величина ППР из грунта может изменяться более чем на порядок на протяжении года [38; 46], поэтому одно значение, измеренное в случайный момент времени, не может служить основанием для принятия решения о реализации мероприятий по защите от радона;

– *непредставительность* величины ППР как контрольного уровня — не определен способ измерения ППР, поэтому измерения чаще всего проводятся с поверхности грунта, тогда как на глубине закладки фундамента величина ППР может существенно отличаться. Кроме того, само численное значение 80 мБк/(м²·с) было получено с использованием ряда не оправдавшихся впоследствии предположений;

– *неинформативность* величины ППР — при отнесении участка застройки к потенциально радоноопасному измеренная величина ППР не дает исходных данных для проектирования противорадоновой защиты здания.

Плотность потока радона с поверхности грунта является чисто технической величиной, ее неоправданное включение в санитарные нормы привело лишь к сдерживанию развития методов оценки радоноопасности площадей застройки. Для обеспечения радонобезопасности проектируемых зданий необходим совершенно новый подход к методу прогнозирования их радонового режима, заключающийся в совместном рассмотрении результатов оценки радоновой нагрузки на подземную часть здания и ее конкретного проектного решения.

3.4. Экспериментальное определение параметров диффузионного переноса в пористой среде

Как уже было показано в п. 3.2, диффузионный перенос радона в проницаемой среде описывается законом Фика [43]: плотность потока газа q через элементарный слой прямо пропорциональна

градиенту его объемной активности в слое и коэффициенту диффузии радона в материале данного слоя

$$q = -D \cdot \frac{\partial A}{\partial x}, \text{ Бк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}), \quad (3.22)$$

где D — объемный коэффициент диффузии радона в данной среде, $\text{м}^2/\text{с}$; A — объемная активность радона, $\text{Бк}/\text{м}^3$.

Диффузия подразумевает перенос атомов или молекул вещества за счет их собственной энергии. В общем случае диффузионный перенос представляет собой достаточно сложный процесс, зависящий не только от градиента концентрации, но и градиентов давления (бародиффузия) и температуры (термодиффузия), химических превращений (хемодиффузия), действия электрического поля (электродиффузия). Но ввиду ничтожно малого массового содержания радона в почвенном газе и его химической инертности хемо- и электродиффузия в процессе переноса радона в грунтах и строительных конструкциях не участвуют, поэтому уравнение (3.22) может быть записано в виде

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -q_{\text{diff}} = D \nabla \left(\nabla A + \frac{k_T}{T} \nabla T + \frac{k_P}{P} \nabla P \right), \quad (3.23)$$

где T — температура, К; P — давление, Па; k_T и k_P — безразмерные коэффициенты термо- и бародиффузии, соответственно.

Вопрос о влиянии перепада температуры и давления в капиллярно-пористых средах на процесс диффузионного переноса радона малоизучен [59]. Считается, что эффекты термо- и бародиффузии незначительны при в реальных условиях эксплуатации зданий, однако данное предположение требует экспериментального подтверждения.

В (3.23) *объемный коэффициент диффузии* характеризует диффузионную радонопроницаемость материала конструкции или грунта. Он представляет собой объемную активность радона, которая переносится за 1 с через слой материала площадью 1 м^2 и толщиной 1 м при разности объемных активностей радона на границах слоя, равной $1 \text{ Бк}/\text{м}^3$.

В пористых материалах диффузионный перенос происходит через поровое пространство, проницаемость которого характеризуется величиной *эффективного коэффициента диффузии* $D_{эф}$. Значения объемного и эффективного коэффициентов диффузии связаны соотношением

$$D = \varepsilon \cdot D_{эф} , \quad (3.24)$$

где ε — пористость материала.

В случае осложнения молекулярной диффузии воздействием неоднородного поля температуры или давления (термо- или бародиффузия) для оценки радонопроницаемости материала целесообразно использовать понятие *эквивалентного коэффициента диффузии* $D_{эке}$. в виде

$$D_{эке} = D_{эф} \cdot k(\Delta T) \cdot k(\Delta P) , \quad (3.25)$$

где $D_{эф}$ — эффективный коэффициент диффузии радона в среде, $\text{м}^2/\text{с}$.

С целью исследования влияния разностей температур и давлений на перенос радона в пористых средах в лаборатории радиационной безопасности в строительстве НИИ Строительной физики РААСН была разработана экспериментальная установка (рис. 3.14).

Труба из ПВХ с наружным диаметром 160 мм и высотой 1 500 мм заполнялась концентратом циркониевым зернистым (КЦЗ), который формировал среду для переноса почвенного газа и одновременно являлся мощным источником радона из-за высокого содержания в нем естественных радионуклидов ($A_{эфф} \approx 4\,500$ Бк/кг). Такая удельная активность позволяет получить высокие потоки радона в материале, но сам КЦЗ не представляет опасности для здоровья контактирующих с ним лиц.

Заглушка III в верхней части установки служит для герметизации внутреннего объема трубы и измерения плотности потока радона (ППР) с поверхности материала. Определение ППР производилось методом пассивной сорбции, по окончании экспонирования активированный уголь пересыпался в блок детектирования бета-радиометра РГБ 20П2 измерительного комплекса «Камера».

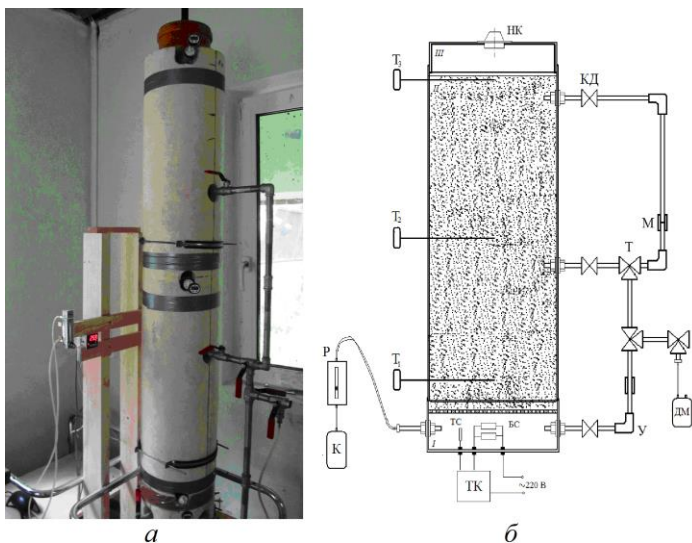


Рисунок 3.14 — Установка для исследования переноса радона в пористых средах: а — внешний вид; б — схема: НК — камера накопительная; Р — ротаметр; T_1 , — T_3 — термометры погружные; ТК — термоконтроллер; ТС — термосопротивление; БС — блок сопротивлений; КД — кран двухходовой; Т — кран трехходовой; У — переходник угловой 90°; К — компрессор; М — муфта; ДМ — манометр дифференциальный

В нижней камере I экспериментальной установки размещались вводы пневматической и электрической систем, перепад температур по столбу пористой среды создавался двумя соединенными

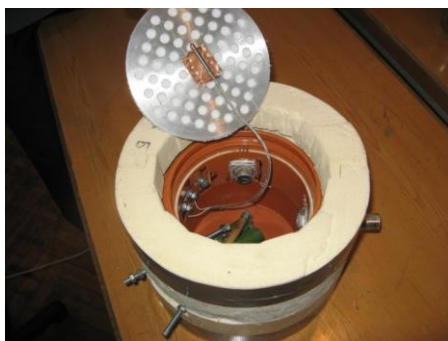


Рисунок 3.15 — Нижняя камера I экспериментальной установки в сборе

параллельно керамическими сопротивлениями $R_1 = R_2 = 13$ кОм, которые включались в сеть через температурный контроллер, осуществлявший поддержание в объеме под пористой средой установленной температуры. В качестве чувствительного элемента контроллера использовалось закрепленное на крышке термосопротивление в верхней части камеры I (рис. 3.15).

Измерение поля температур по оси установки осуществлялось тремя погружными термометрами с заявленной погрешностью не более $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Алюминиевая крышка диаметром 160 мм и толщиной 5 мм, установленная на специальной подставке из ПВХ, выполняла несущую функцию. Для того, чтобы крышка не оказывала сопротивления прохождению воздушного потока, в ней были высверлены отверстия диаметром 10 мм.

Также в нижней части камеры *I* располагался ввод пневматической системы, предназначенной для создания перепада давлений по столбу пористой среды при исследовании бародиффузии. Пневматическая система включала маломощный компрессор постоянного действия, подающий поток воздуха через поплавковый ротаметр, предназначенный для измерения потоков воздуха в диапазоне от $100\text{ см}^3/\text{мин}$. Для измерения перепада давления в установке были реализованы три ввода на расстоянии $0,7\text{ м}$ друг от друга, которые посредством латунных труб подключались к дифференциальному манометру высокой чувствительности.

Первоначально плотность потока радона определялась в условиях чисто диффузионного переноса при отсутствии перепадов давлений и температур по высоте столба КЦЗ. Измерения проводились с момента сборки экспериментальной установки и до наступления радиоактивного равновесия в герметичной верхней камере. Наступление равновесия фиксировалось по прекращению нарастания средних за неделю значений ППР, к моменту наступления равновесия ППР составила около $320\text{ мБк}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$. Столь высокие значение ППР, полученные благодаря использованию циркониевого концентрата, позволяют регистрировать эффекты, потенциально менее значимые, чем поток радона, вызванный молекулярной диффузией.

При исследовании влияния термодиффузии на перенос радона в пористой среде в нижней камере устанавливалась избыточная температура, которая в дальнейшем поддерживалась постоянной температурным регулятором. Перепад температур изменялся от 5 до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ с шагом в $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, производилось 12 измерений для каждой разности температур (трое суток). Зависимость среднего значения ППР радона от перепада температур по столбу пористой среды представлена на рис. 3.16.

Результаты исследования влияния термодиффузии показали тенденцию к линейному росту ППР с увеличением разности

температур на границах пористой среды (достоверность линейной аппроксимации $R^2 = 0,8768$). Таким образом, необходим учет влияния термодиффузионных эффектов на перенос радона в пористой среде, при этом из уравнения аппроксимирующей кривой получается следующее выражение для коэффициента термодиффузии

$$k(\Delta T) = 1 + 0,006 \cdot \Delta T.$$

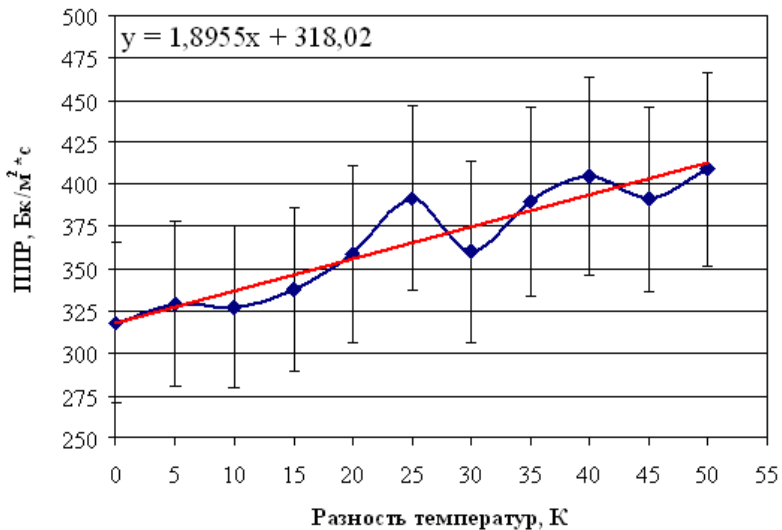


Рисунок 3.16 — Результаты измерения плотности потока молекулярной и термической диффузии

При исследовании влияния бародиффузии на перенос радона компрессором в нижней камере экспериментальной установки создавалось избыточное давление, которое регулировалось ротаметром за счет изменения величины расхода подаваемого воздуха. Статистически значимое увеличение ППР имело место при перепадах давлений $\Delta P \geq 50$ Па. Поскольку в реальных условиях температурно-индуцированный перепад давлений не превышает 3–5 Па, то нет необходимости во введении коэффициента $k(\Delta P)$, учитывающего влияние бародиффузии на процесс поступления радона в здания. В результате исследований для эквивалентного коэффициента диффузии было получено выражение

$$D_{\text{экв}} = (1 + 0,006 \cdot \Delta T) \cdot D_{\text{эф}}. \quad (3.26)$$

Использование эквивалентного коэффициента диффузии существенно упрощает математическое описание диффузионного переноса радона в системе «грунт-атмосфера-здание».

3.5. Экспериментальное исследование закономерностей поступления радона в здания равнинных территорий

Традиционно считается, что высокие уровни радона в воздухе помещений могут иметь место только на потенциально радоноопасных территориях, для которых характерно повышенное содержание естественных радионуклидов в коренных породах, наличие зон активной микрогеодинамики или разломных структур, создающих условия для переноса радона с больших глубин. В то же время, условия формирования радоновой обстановки в зданиях нерадоноопасных территорий исследованы значительно меньше и потому радиационный мониторинг таких территорий является актуальной научно-практической задачей.

К *потенциально нерадоноопасным* территориям относятся области вне зон текущей активной геодинамики, для которых не характерно присутствие в геологическом разрезе необходимых пород-коллекторов радона или пород с высокими концентрациями ^{226}Ra . Таковыми, в первую очередь, являются равнинные территории, для которых характерно преобладание горизонтальной расчлененности геологической среды над вертикальной, в результате чего затруднен перенос газов в вертикальном направлении. Поскольку глубина поступления радона в здания и сооружения даже для наиболее проницаемых грунтов не превышает 15 м, то для равнинных платформенных территорий радоновая нагрузка на подземные ограждающие конструкции здания определяется литологическим составом и содержанием радия в приповерхностных грунтах.

К числу равнинных территорий РФ, приуроченных к плитам молодых платформ, не имеющих выходов фундамента на поверхность, относятся Средне-Русская, Смоленско-Московская и Приволжская возвышенности, Северные Увалы и Тиманский кряж на Русской плите, Средне-Сибирское плоскогорье — на Ленно-Енисейской, Печорская

низменность — на Печорской, равнина Предкавказья — на Скифской, Западно-Сибирской равнина — на Западно-Сибирской плите. Равнинные области занимают около 75 % территории Российской Федерации.

Изучение уровня радоновой нагрузки на население равнинных областей производилось на территории Луганска, представляющей денудационно-аккумулятивную равнину, которую на глубине около 1 км пересекают два разлома Северо-Донецкого надвига, погребенные чехлом более поздних отложений и не оказывающие влияния на перенос вещества к дневной поверхности. Радиационный мониторинг городской застройки Луганска, включавший три основных этапа:

- оценку относительной радоноопасности районов города (районирование территории выполнялось по административному принципу) по результатам измерения ЭРОА радона в воздухе помещений;

- выбор экспериментальных объектов, определение в них среднегодовых ЭРОА радона и МЭД γ -излучения стройматериалов;

- расчет годовых доз облучения в исследуемых объектах.

В структуре Луганска находится четыре района: Жовтневый (около 42 % населения), Артемовский (33 %), Ленинский (17 %), Каменнобродский (8 %). В наибольшем по площади Каменнобродском районе более 90 % зданий — это частное жилье со средним возрастом свыше 50 лет; в основе жилищного фонда центрального Ленинского района 5- и 9-этажные кирпичные здания 60-х годов постройки; в Жовтневом районе преобладают 5-этажные кирпичные и 9-этажные панельные жилые дома 1965–1985 годов постройки; наиболее новым является Артемовский район, большая часть населения которого проживает в 12–16-этажных домах, построенных с конца 80-х по середину 90-х годов.

Все измерения проводились в «закрытых» помещениях, то есть не открывавшихся минимум 24 часа до начала замеров. В этих же помещениях производилось измерение МЭД гамма-излучения строительных материалов. Результаты исследования уровней радона в районах города представлены в табл. 3.3 (соотношение частного жилья и многоэтажных зданий выбиралось пропорционально их количеству в структуре жилищного фонда района).

Таблица 3.3 — Результаты измерений уровней радона и мощности γ -излучения в зданиях Луганска

Район города	Тип зданий	Число измерений	ЭРОА _{ср} , Бк/м ³	МЭД, мкЗв/час
Артемовский	частное жилье	50	13,7 ± 2,4	0,113
	многоэтаж.	20	68,9 ± 39,1	0,118
Каменнобродский	частное жилье	192	240,4 ± 23,0	0,121
	многоэтаж.	15	44,0 ± 7,0	0,115
Ленинский	частное жилье	78	33,6 ± 5,0	0,107
	многоэтаж.	92	40,9 ± 5,6	0,117
Жовтневый	частное жилье	192	69,6 ± 3,7	0,115
	многоэтаж.	94	24,8 ± 2,3	0,119

Статистическая обработка результатов измерений показала, что частотное распределение помещений по величине ЭРОА носит лог-нормальный характер, тогда как для мощности дозы (МЭД) γ -излучения характерно нормальное распределение (рис. 3.17).

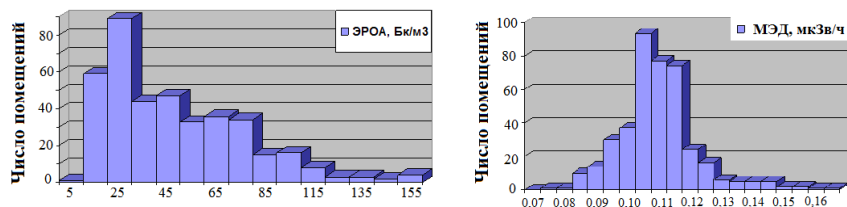


Рисунок 3.17 — Характер распределения помещений г. Луганска по величине ЭРОА и МЭД

Результаты настоящих исследований показали, что превышение национального контрольного уровня среднегодовой эквивалентной равновесной объемной активности радона возможно и на потенциально нерадоноопасных территориях. Повышенная радоноопасность зданий в Каменнобродском районе может быть обусловлена комплексным воздействием факторов различной природы:

1. Достаточно высокая воздухопроницаемость мергелевых глин (более 10^{-12} м^2), формирующих подстилающую поверхность, создает условия для конвективного переноса радона в грунте, существенно повышая мощность так называемого «активного слоя».

2. Низкое сопротивление радонопроницанию подземных ограждающих конструкций, характерное для частных домостроений

возрастом более 30 лет, преобладающих в данном районе. Большинство обследованных объектов не имели герметичной подземной оболочки.

Ввиду повышенной чувствительности к облучению радоном детей в возрасте до десяти лет, исследования второго этапа проводились в четырех дошкольных образовательных учреждениях (ДОУ) Каменнобродского района Луганска [6; 7]. Объекты исследования, выполненные по типовому проекту, находились в разных частях района и имели сходную архитектуру: двухэтажные кирпичные здания возрастом более сорока лет без монолитного фундамента. Мгновенные измерения уровней радона производились во всех помещениях ДОУ, кроме того, раз в месяц в группах выполнялись непрерывные измерения на протяжении не менее 48 часов с интервалом в один час в закрытых помещениях.

Проведенные исследования показали высокие уровни радона в трех из четырех ДОУ (табл. 3.4), при оценке индивидуальной годовой дозы облучения время пребывания детей в помещении принималось 2000 ч/год и еще 400 ч/год — пребывание на территории ДОУ. При переходе от экспозиции к дозе облучения радоном использовался конверсионный множитель $11,9 \text{ нЗв}/(\text{Бк}\cdot\text{ч}/\text{м}^3)$, приведенный в стандарте МАГАТЭ «Защита населения от природных источников излучения в зданиях» [137].

Таблица 3.4 — Результаты радиационного мониторинга ДОУ

ДОУ, адрес	ЭРОА, Бк/м ³	МЭД _{пом.} , мкЗв/ч	МЭД _{ул.} , мкЗв/ч	Годовая доза, мЗв
ДОУ «Ясли-садик № 57», ул. Рудя, 91	220,7	0,115	0,125	5,53
ДОУ «Детский сад № 10», ул. Рудя, 73, а	165,7	0,105	0,125	4,20
ДОУ «Ясли-садик комбинированного типа № 55», ул. 21-го Мюда, 54	244,5	0,110	0,125	6,09
ДУУ «Ясли-садик № 97», ул. Артема, 100	27,0	0,115	0,125	0,92

Результаты измерений ЭРОА радона в одном из дошкольных образовательных учреждений представлены на рис. 3.18.

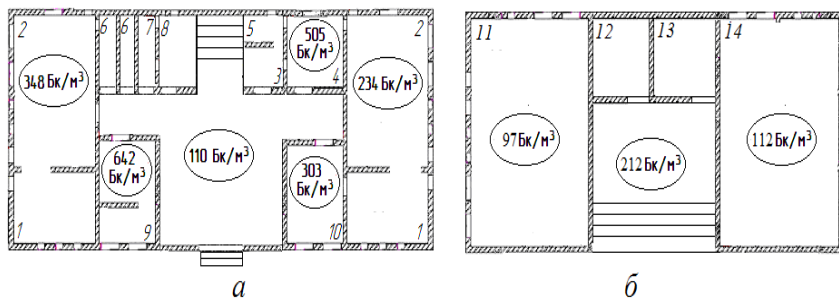


Рисунок 3.18 — Среднегодовые уровни радона в яслях-садике № 57: а — первый этаж; б — второй этаж; 1 — спальня; 2 — игровая; 3 — кухня; 4 — столовая; 5 — моечная; 6 — туалетная с умывальной; 7 — санузел для персонала; 8 — кладовая; 9 — кабинет заведующей; 10 — кабинет логопеда; 11 — методический кабинет; 12 — бухгалтерия; 13 — хозяйственное помещение; 14 — музыкальный зал

В лаборатории радиационной безопасности в строительстве НИИ строительной физики Российской Академии архитектуры и строительных наук Минстроя России был выполнен гамма-спектрометрический анализ грунта (мергелевая глина), отобранного на глубине закладки фундамента на территории ДОУ с наибольшим средним ЭРОА радона в помещениях («Ясли-садик комбинированного типа № 55»). Удельная активность радия в грунте составила

$$C_{Ra} = 35,0 \pm 6,8 \text{ Бк/кг},$$

а удельная эффективная активность естественных радионуклидов в грунте, определяемая по формуле

$$A_{эфф} = C_{Ra} + 1,3C_{Th} + 0,09C_K,$$

составила

$$A_{эфф} = 104,5 \pm 22,9 \text{ Бк/кг}.$$

Полученный результат позволяет отнести данный грунт к почвам со средним содержанием ЕРН (среднемировое содержания радия в почвах составляет 29,7 Бк/кг). Таким образом, в результате проведенного исследования было установлено, что существенное

превышение контрольного уровня ЭРОА радона может иметь место в зданиях, построенных на грунтах со средним содержанием радия.

Оценка закономерностей формирования уровней радона в многоэтажных зданиях производилась в Луганском национальном университете имени Тараса Шевченко. В период с декабря по февраль было обследовано 175 учебных и служебных помещений экспрессным методом с целью выявления помещений с наиболее высокими уровнями радона. Достаточно высокие значения ЭРОА на верхних этажах (рис. 3.19) могут свидетельствовать о значимом вкладе выделения радона из материалов ограждающих конструкций при недостаточной вентиляции помещений, а также о возможном переносе радона конвективными потоками с нижних этажей здания.

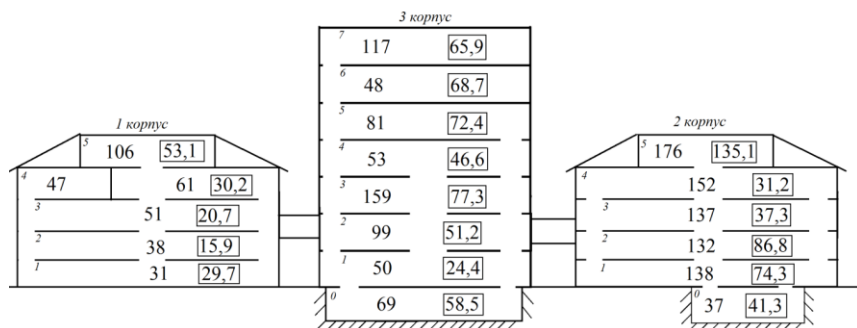


Рисунок 3.19 — Распределения уровней радона по высоте зданий: ЭРОА радона в коридорах и аудиториях университета (в прямоугольнике)

Проведенные исследования показали, что уровни радона в помещениях университета не превышают установленные контрольные уровни, однако в зимнее время близки к ним, что указывает на обоснованность проведения простейших защитных мероприятий (обеспечение кратности воздухообмена не менее $0,5 \text{ ч}^{-1}$).

Одним из наиболее интересных и сложных аспектов проблемы обеспечения радоновой безопасности зданий является изучение динамики поступления радона из грунта в здание. Противоречивость экспериментальных данных, получаемых различными исследователями, объясняется, в первую очередь, многофакторностью процесса переноса почвенного газа в системе «грунт-здание-атмосфера».

Исследование динамики поступления радона производилось в учебной лаборатории 0–06 «Теоретическая и прикладная механика», расположенной на цокольном этаже учебного корпуса № 3 и имеющей основание в виде монолитной железобетонной плиты толщиной 350 мм. В лаборатории было выполнено 680 измерений ЭРОА радона при одновременной фиксации разности температур внутри и снаружи помещения для идентификации движущих сил поступления радона. Исследования представляли четыре двухнедельных цикла непрерывных измерений на протяжении года при стационарном режиме эксплуатации лаборатории.

Регистрируемая картина для всех циклов измерений имела сходный вид: ярко выраженный максимум (чаще всего один за сутки) и чередование выступов и провалов меньшей амплитуды (рис. 3.20, а). Максимумы ЭРОА регистрировались в произвольное время суток, усреднение результатов измерений по сезонам приводит к сглаживанию кривых (рис. 3.20, б), указывая на отсутствие цикличности в поступлении радона в здания. Таким образом, экспериментально доказан несущественный вклад конвективного переноса радона в помещения с герметичным основанием.

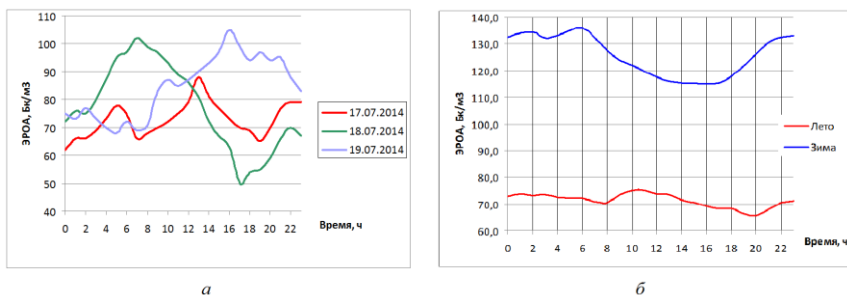


Рисунок 3.20 — Вариации уровней радона в помещениях: а — суточные; б — сезонные

Средние уровни радона для помещений цокольного этажа составили $71,3 \pm 4,6$ и $125,5 \pm 7,9$ Бк/м³ для теплого и холодного сезонов соответственно. Гамма-спектрометрический анализ глинистого грунта, отобранного в основании 3-го корпуса университета также был выполнен в лаборатории радиационной безопасности в строительстве НИИСФ РААСН и показал среднее содержание радия

$$C_{Ra} = 37,5 \pm 6,7 \text{ Бк/кг}$$

при удельной эффективной активности ЕРН в грунте

$$A_{эфф} = 112,0 \pm 22,5 \text{ Бк/кг.}$$

Поскольку температура в экспериментальной лаборатории на протяжении всего периода измерений менялась несущественно ($\pm 1,5^\circ\text{C}$), при статистической обработке данных вместо температурного напора ΔT использовалась температура наружного воздуха T .

Коэффициент парной корреляции между ЭРОА радона и температурой воздуха снаружи здания по всему циклу измерений составил

$$r_{ЭРОА-T} = -0,875.$$

Однако аналогичные коэффициенты, рассчитанные отдельно по каждому из четырех циклов измерений были существенно ниже ($r_{ЭРОА-T} = -0,15 \dots -0,25$), что может свидетельствовать об изменении условий переноса радона из почвенного массива к подземным ограждающим конструкциям здания. Так, увеличение влажности грунта вокруг здания и его промерзание могут привести к уменьшению коэффициента диффузии радона в поровом пространстве, увеличив тем самым радоновую нагрузку на основание.

Подтверждением данного предположения может служить резкое снижение ЭРОА радона, отмеченное при длительных исследованиях радоновой обстановки в учебном корпусе обособленного подразделения университета, расположенном в Жовтневом районе города (рис. 3.21, *а*). Измерения проводились в «закрытом» помещении цокольного этажа с 10 по 17 марта с периодичностью в два часа. На рис. 3.21, *б* показано изменение среднесуточной температуры в Луганске: на протяжении более чем двух месяцев температура находилась в отрицательной области, а после 22 февраля поднялась выше нуля и в отрицательную область более не опускалась. Сопоставление рисунков 3.21, *а* и 3.21, *б* показывает, что промерзание грунта играет достаточно важную роль в формировании уровней радона в зданиях и сооружениях.

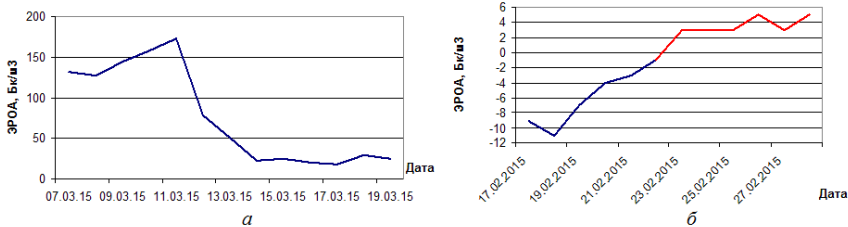


Рисунок 3.21 — Вариации уровней радона в помещениях: а — цокольный этаж; б — верхний этаж

Можно предположить, что при переходе в область отрицательных атмосферных температур и промерзания грунта частично перекрываются пути выхода радона из почвы в атмосферу, то есть существенно снижается ее радонопроницаемость. В то же время глубина промерзания грунта, непосредственно контактирующего с фундаментом здания, существенно меньше. Как следствие, увеличивается радоновая нагрузка на подземные ограждающие конструкции здания, а значит — интенсивность поступления радона внутрь сооружений. Сама интенсивность поступления может определяться конструкцией и состоянием фундамента здания, содержанием радионуклидов в почве и ее влажностью на момент наступления отрицательных климатических температур и т. д.

Для эксплуатируемых помещений, не граничащих с грунтовым основанием, представляет интерес определение фактической скорости поступления радона, которая может быть найдена экспериментально. В процессе исследований начальная ЭРОА радона A_0 измерялась в помещении 5-го этажа учебного корпуса № 3 перед его переходом из режима эксплуатации в «закрытый» режим. После герметизации помещения с интервалом в один час в автоматическом режиме производились измерения ЭРОА радона в данном помещении, результаты измерений представлены на рис. 2.22, а. Во всех измерениях наблюдался процесс с выходом на насыщение в течение нескольких часов измерений и дальнейшие незначительные колебания около установившегося уровня. Удельное поступление радона из строительных материалов определялось по формуле

$$a_{см} = \frac{\lambda \cdot (A(t) - A_0) \cdot e^{-\lambda t}}{1 - e^{-\lambda t}}, \quad (3.27)$$

где t — время выхода кривой ЭРОА на насыщение, с; $A(t)$ — ЭРОА радона в помещении в момент времени t , Бк/м³.

По результатам измерений среднее значение удельного поступления радона из строительных материалов составило $a_{см} = 0,0026$ Бк/(м³·с), что эквивалентно средней скорости выделения радона (при объеме помещения 39 м³ и площади эманлирующих поверхностей 72,4 м²)

$$q_{см} = a_{см} \cdot \frac{V}{S} = 0,0026 \cdot \frac{39}{72,4} = 0,0014 \text{ Бк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) = 1,4 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

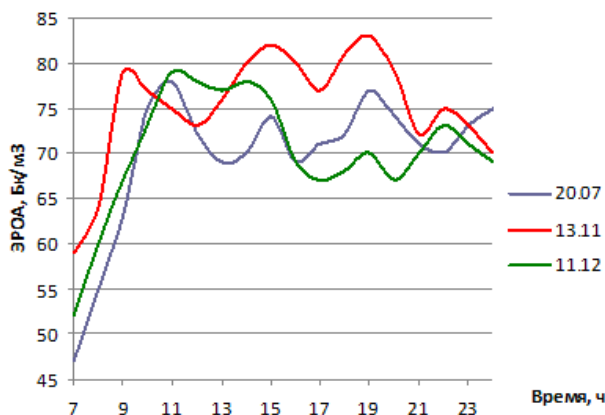


Рисунок 3.22 — Исследование уровней радона: а — суточные измерения в помещении верхнего этажа; б — длительные измерения в помещении цокольного этажа

Ряд математических моделей, описывающих формирование радоновой обстановки в здании, рассматривают в качестве источника радона его инфильтрационное поступление с атмосферным воздухом. В этой связи представляет определенный интерес оценка уровней радона в атмосферном воздухе и выявление закономерностей их изменения.

Оценка содержания радона в атмосфере проводилось на территории студенческого городка ЛНУ имени Тараса Шевченко при прокачке больших объемов воздуха (250 литров), приборная погрешность радиометра составляла при этом 15–20 %. Измерения ЭРОА радона выполнялись на расстоянии не менее 40 м

от ближайшего здания с целью уменьшения влияния на результат ветровых потоков вдоль зданий. с интервалом в один час с 7⁰⁰ до 19⁰⁰. Всего было проведено три цикла измерений — в теплый период года (13 мая), в холодный период года (15 ноября), а также 02 декабря после выпадения значительного количества осадков в виде снега (толщина покрова — 40 см). Результаты изменений ЭРОА радона в атмосферном воздухе представлены на рис. 3.23.

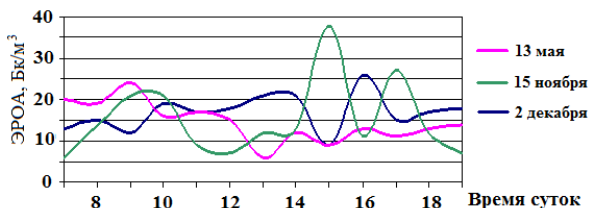


Рисунок 3.23 — Суточная динамика уровней радона в атмосферном воздухе

Для уровней радона в атмосферном воздухе характерно чередование пиков и провалов, что может свидетельствовать о порционном поступлении радона в атмосферу вследствие геологических процессов. К тому же, исследования не выявили корреляции между уровнями радона и изменениями температуры, давления или скорости ветра. По результатам измерений среднее геометрическое ЭРОА радона равнялось $14,4 \pm 5,9$; для мая, ноября и декабря составили $13,7 \pm 4,8$; $13,1 \pm 9,5$ и $16,4 \pm 4,4$ Бк/м³ соответственно.

Также исследовалось распределение радона в атмосферном воздухе по высоте, для чего были проведены измерения ЭРОА радона от уровня земли до высоты 30 м (максимально доступный уровень) с шагом в 5 м в разные сезоны. Для измерений на высоте использовались открытые площадки студенческого общежития. Перед измерениями радиометр производил учет фона, что позволяло исключить влияние на результат излучения от строительных материалов здания. Результаты распределения уровней радона по высоте представлены на рис. 3.24.

Исследование распределения уровней радона по высоте атмосферного воздуха в пределах 30 м не выявило тенденции к снижению ЭРОА с высотой, а также каких-либо сезонных закономерностей.

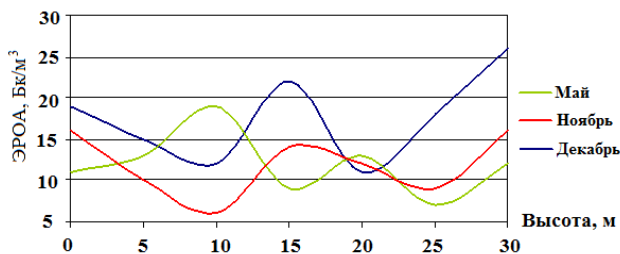


Рисунок 3.24 — Изменение ЭРОА радона в атмосферном воздухе с высотой

Возможность формирования неблагоприятной радоновой обстановки в зданиях нерадоноопасных равнинных территорий требует реализации комплекса противорадоновых мероприятий. Наиболее доступным из подобных мероприятий является естественная вентиляция помещений, поэтому представляет практический интерес оценка ее эффективности.

В качестве объекта исследования был выбран нежилой неотапливаемый двухэтажный дом в наиболее радоноопасном Каменнобродском районе, имеющий в качестве фундамента бетонную отмостку на щебеночном основании. По результатам месячных измерений (декабрь) были определены средние значения ЭРОА радона в нескольких комнатах данного дома (рис. 3.25). Полученные результаты в целом находились в соответствии со средними по Каменнобродскому району значениями объемной активности радона в частных домостроениях.

Исследование эффективности вентиляции в данном объекте производилось следующим образом. Непосредственно после фиксации высокой концентрации радона в герметизированном помещении нижнего этажа ($\text{ЭРОА}_0 = 392 \text{ Бк/м}^3$, $t_0 = 21 \text{ }^\circ\text{C}$) осуществлялось его проветривание на протяжении 30 мин до температуры $t_1 = 17 \text{ }^\circ\text{C}$ (температура наружного воздуха составляла $t_{\text{воз}} = 2,6 \text{ }^\circ\text{C}$). Дальнейшие измерения ЭРОА радона в данном «закрытом» помещении выполнялись с интервалом в один час, динамика роста активности радона представлена на рис. 3.26.

Проведенные исследования показали, что вентиляция является эффективным, простым и дешевым методом снижения уровней радона в эксплуатируемых зданиях. Даже кратковременный естественный воздухообмен позволяет снизить концентрацию радона в помещении минимум на два порядка.

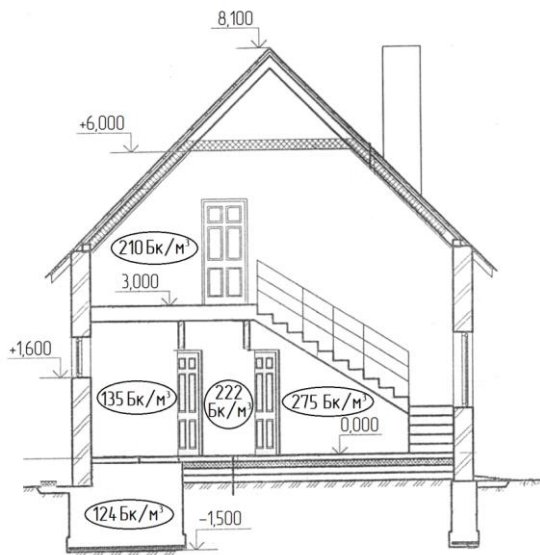


Рисунок 3.25 — Средние уровни радона в объекте исследования



Рисунок 3.26 — К оценке эффективности естественной вентиляции

В целом же проведенные лабораторные и натурные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Классификация территорий на потенциально радоноопасные и нерадоноопасные исключительно по геофизическим характеристикам подстилающей поверхности достаточно условна.

2. Использование в качестве критерия радоноопасности участка строительства плотности потока радона с поверхности грунта нецелесообразно ввиду непредставительности и неинформативности данной величины.

3. Превышение национального контрольного уровня ЭРОА часто имеет место на грунтах со средним содержанием радия, что указывает на крайне важную роль состояния подземной оболочки здания в формировании радоновой обстановки в нем.

Таким образом только рассмотрение процессов переноса радона в рамках единой системы «грунт-атмосфера-здание» позволит корректно описать закономерности формирования радоновой обстановки в зданиях. Но ввиду многофакторности данного процесса наиболее эффективным средством его исследования является математическое моделирование, позволяющее фиксировать и целенаправленно изменять параметры формирования радоновой обстановки.

ГЛАВА 4

Модельное исследование переноса радона в системе сред «грунт — атмосфера — здание»

4.1. Расчет радоновой нагрузки на заглубленные ограждающие конструкции

Многолетний опыт разработки строительных норм и правил, накопленный в НИИ Строительной физики РААСН, показывает, что математическое описание реального процесса будет адекватно реальным условиям только в том случае, когда рассматривается система, включающая в себя все параметры, оказывающие значимое влияние на величину исследуемого параметра. Формирование радоновой обстановки необходимо рассматривать в рамках единой системы сред «грунт-атмосфера-здание», а все факторы, значимо влияющие на уровни радона в зданиях, можно разделить на конструктивные, геофизические и метеорологические.

К *геофизическим факторам* относятся характеристики грунтового основания здания. Наиболее важными из них являются коэффициент диффузии радона в грунте, его пористость и проницаемость, а также коэффициент эманирования радона и мощность источников радона в грунте. Определенное влияние на величину радоновой нагрузки на основание здания оказывает уровень грунтовых вод, которые поглощают практически весь радон из расположенных ниже слоев грунта.

Группа *конструктивных факторов* формирования радоновой обстановки в здании учитывает особенности конструкции здания и условия его эксплуатации. Важнейшим показателем в данной группе является суммарная радонопроницаемость (или сопротивление радонопроницанию) конструкции пола. Кроме того, на интенсивность поступления радона влияют величина заглубления и ширина здания. Группа *метеорологических факторов* устанавливает

связь температуры, давления, влажности и скорости ветра с величиной поступления радона в здание. Таким образом, атмосфера, здание и граничащий с его подземными ограждающими конструкциями грунт представляют собой элементы единой природно-техногенной системы.

Поскольку физические характеристики конструкций здания существенно отличаются от физических характеристик грунта, то распределение концентрации радона в грунте в окрестности заглубленной части здания существенно отличается от его распределения в открытом грунте.

Для здания неограниченной протяженности с заданными значениями ширины и заглубления (рис. 4.1) функция распределения концентрации радона в однородном грунте в вертикальном сечении

$$S = \{ 0 \leq x \leq H_x, 0 \leq y \leq H_y \}$$

определяется путем решения системы дифференциальных уравнений

$$D_s \left(\frac{\partial^2 A_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_s}{\partial y^2} \right) - A_s(x, y) \cdot \lambda + G_s = 0, \quad (4.1)$$

где $s = 1, 2$ для заглубленной части здания или для грунта, соответственно; $A_s = A(x, y)$ — объемная активность радона, Бк/м³; D_s — коэффициент диффузии радона в данной среде, м²/с; G_s — генерация радона в материале или грунте, определяемая по формуле (3.7).

Граничные условия к системе уравнений имеют следующий вид:

– газообмен на границах подземной ограждающей конструкции

$$D_1 \left(\frac{\partial A_1}{\partial y} \right) = \alpha \cdot A_1 \text{ при } 0 \leq x \leq d, y = 0; \quad (4.2)$$

$$D_2 \left(\frac{\partial A_2}{\partial y} \right) = \alpha \cdot A_2 \text{ при } d \leq x \leq H_x, y = 0; \quad (4.3)$$

– объемная активность радона постоянна в горизонтальных сечениях подземной горизонтальной ограждающей конструкции

$$D_1 \left(\frac{\partial A_1}{\partial x} \right) = 0 \text{ при } x = 0, 0 \leq y \leq h_{zn}; \quad (4.4)$$

– отсутствие потоков радона через вертикальную и горизонтальную внешние границы рассматриваемого грунтового массива

$$D_2 \left(\frac{\partial A_2}{\partial x} \right) = 0 \text{ при } y = H_y, 0 \leq x \leq H_x \quad (4.5)$$

$$D_2 \left(\frac{\partial A_2}{\partial y} \right) = 0 \text{ при } x = H_x, 0 \leq y \leq H_y; \quad (4.6)$$

– отсутствие переноса радона в горизонтальном направлении в грунте

$$D_2 \left(\frac{\partial A_2}{\partial x} \right) = 0 \text{ при } x = 0, h_{zn} \leq y \leq H_y; \quad (4.7)$$

– равенство потоков и объемных активностей радона на горизонтальной и вертикальной границах раздела сред «грунт — ограждающая конструкция»

$$D_1 \left(\frac{\partial A_1}{\partial x} \right) = D_2 \left(\frac{\partial A_2}{\partial x} \right), A_1 = A_2 \text{ при } x = d, 0 \leq y \leq h_{zn}; \quad (4.8)$$

$$D_1 \left(\frac{\partial A_1}{\partial y} \right) = D_2 \left(\frac{\partial A_2}{\partial y} \right), A_1 = A_2 \text{ при } 0 \leq x \leq d, y = h_{zn}, \quad (4.9)$$

где h_{zn} — заглубление здания, м; d — половина ширины здания, м.

Решение уравнений (4.1) — (4.9), полученное с использованием программного пакета MAPLE, позволяет вычислить значения функции $A(x, y)$ при различных значениях ширины $2d$ и заглубления h_{zn} здания. Типичное распределение изолиний концентрации радона

по глубине в открытом грунте и в грунтовом основании здания при его различном заглублении показаны на рис. 4.2, *a–г*. Для удобства оси координат на рис. 4.2 повернуты относительно ориентации осей на рис. 4.1 на 180° .

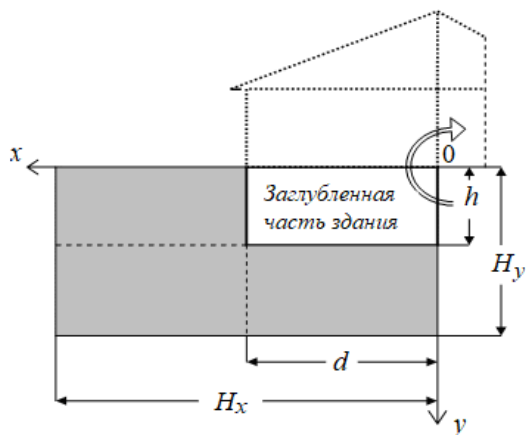


Рисунок 4.1 — Схема к системе уравнений (3.1) — (3.7)

На открытой территории образующийся в поверхностных слоях Земли радон перемещается к дневной поверхности и беспрепятственно выходит в атмосферу. Как видно на рис. 4.2, *a*, в массиве однородного грунта формируется одномерное поле концентрации радона. В каждой из плоскостей, параллельных поверхности Земли, значения концентрации постоянны.

Рис. 4.2, *б* соответствует случаю большого заглубления здания, при этом распределение объемной активности радона приближается к случаю невозмущенного поля концентраций радона в грунте (рис. 4.2, *a*). Из рис. 4.2, *в* и *г* видно, что здание с относительно малым заглублением создает значительное препятствие для свободной разгрузки радона из поверхностного слоя грунта в атмосферу. В силу действия краевых эффектов в основании здания формируется двухмерное поле концентрации радона, что наиболее сильно проявляется при минимальном заглублении здания. Последовательное увеличение заглубления здания ведет к постепенной трансформации двухмерного поля концентрации радона в грунтовом основании (рис. 4.2, *в* и *г*) в одномерное (рис. 4.2, *б*).

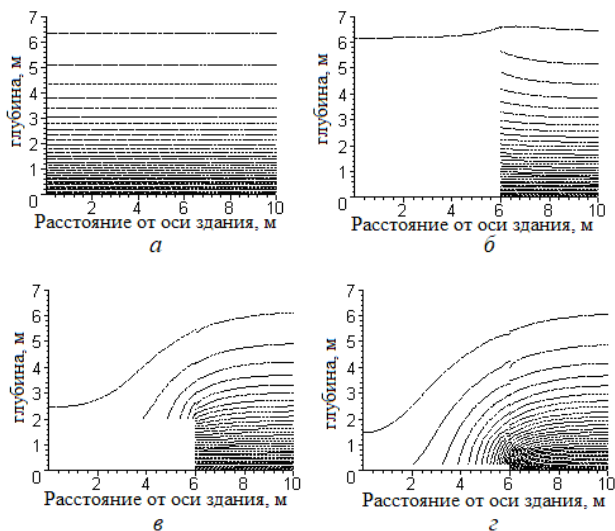


Рисунок 4.2 — Распределение изолиний объемной активности радона: а — в открытом грунте; б — при заглублении здания $h_{гн} = 0,25$ м; в — при заглублении здания $h_{гн} = 2,0$ м; г — при заглублении здания $h_{гн} = 6$ м (верхние линии соответствуют объемной активности радона 31 $\text{кБк}/\text{м}^3$, шаг изолиний — 1 $\text{кБк}/\text{м}^3$)

Расположение изолиний на рис. 4.2, в и г свидетельствует о частичном оттоке радона из-под здания в горизонтальном направлении и дальнейшем его перемещении к дневной поверхности грунта. Вследствие этого вблизи малозаглубленных зданий плотность потока радона из открытого грунта может возрастать по мере приближения к зданию, что неоднократно фиксировалось при проведении полевых измерений. Этому соответствует характер приводимых на рис. 4.3, а кривых, где верхняя линия соответствует случаю $h_{зл} = 0,5$ м, средняя — $h_{зл} = 1,0$ м и нижняя — $h_{зл} = 2,0$ м.

Распределение объемной активности по глубине полуограниченного массива грунта $\{A(y), 0 \leq y \leq H_y\}$ подчиняется экспоненциальному закону (рис. 4.3, б). Ее значения на поверхности массива близки к активности радона в наружном воздухе, а на некоторой глубине, которая зависит от радонопроницаемости грунта, достигают постоянного максимального значения равного

$$P_{Rn} = C_{Razp} \cdot \rho_{sp} \cdot k_{эм} \cdot \quad (4.10)$$

Величина Π_{Rn} , также, как и мощность источника радона в грунте G , характеризует способность грунта к генерации радона и связана с ней соотношением

$$\Pi_{Rn} = \frac{G}{\lambda}. \quad (4.11)$$

Эта величина представляет значение равновесной активности свободного радона, которая устанавливается в единице объема грунтового массива при нулевом значении градиентов активности на границах объема. По своему физическому смыслу величина Π_{Rn} представляет собой описанный выше *радоновый потенциал грунта*.

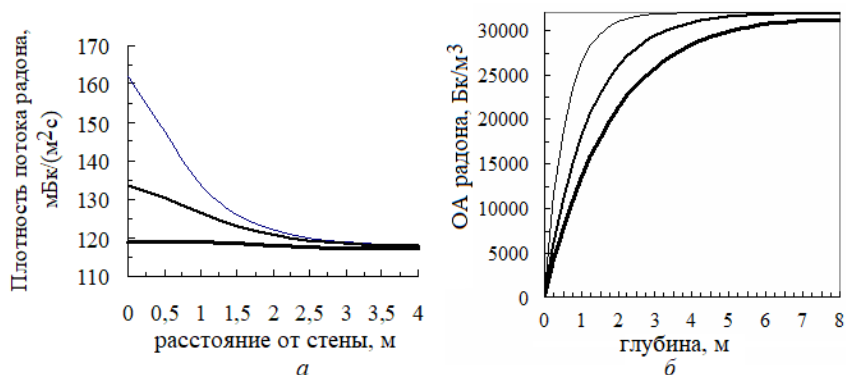


Рисунок 4.3 — Влияние здания на распределение концентрации радона в грунте: а — зависимость ППР радона от расстояния до наружной стены здания; б — зависимость активности радона в грунте от глубины при значениях эффективного коэффициента диффузии D радона в грунте: $1-7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $2-3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $3-1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$

В табл. 4.1 представлены значения радонового потенциала активного слоя грунта, рассчитанные по формуле (3.10) при плотности грунта равной $1900 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Закономерности изменения концентрации радона в плоскости контакта горизонтальной ограждающей конструкции с грунтом, и в параллельных ей нижерасположенных плоскостях для зданий с различным заглублением показаны на рис. 4.4, а и б.

Таблица 4.1 – Радоновый потенциал грунтового основания здания

$A_{Ra\text{ зр}}$, Бк/кг	Коэффициент эманирования радона в грунте, $k_{эм}$					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
10	1,90	3,80	5,70	7,60	9,50	11,40
15	2,85	5,70	8,55	11,40	14,25	17,10
20	3,80	7,60	11,40	15,20	19,00	22,80
25	4,75	9,50	14,25	19,00	23,75	28,50
30	5,70	11,40	17,10	22,80	28,50	34,20
35	6,65	13,30	19,95	26,60	33,25	39,90
40	7,60	15,20	22,80	30,40	38,00	45,60
45	8,55	17,10	25,65	34,20	42,75	51,30
50	9,50	19,00	28,50	38,00	47,50	57,00
55	10,45	20,90	31,35	41,80	52,25	62,70
60	11,40	22,80	34,20	45,60	57,00	68,40
65	12,35	24,70	37,05	49,40	61,75	74,10
70	13,30	26,60	39,90	53,20	66,50	79,80
$A_{Ra\text{ зр}}$, Бк/кг	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
75	14,25	28,50	42,75	57,00	71,25	85,50
80	15,20	30,40	45,60	60,80	76,00	91,20
85	16,15	32,30	48,45	64,60	80,75	96,90
90	17,10	34,20	51,30	68,40	85,50	102,60
95	18,05	36,10	54,15	72,20	90,25	108,30
100	19,00	38,00	57,00	76,00	95,00	114,00

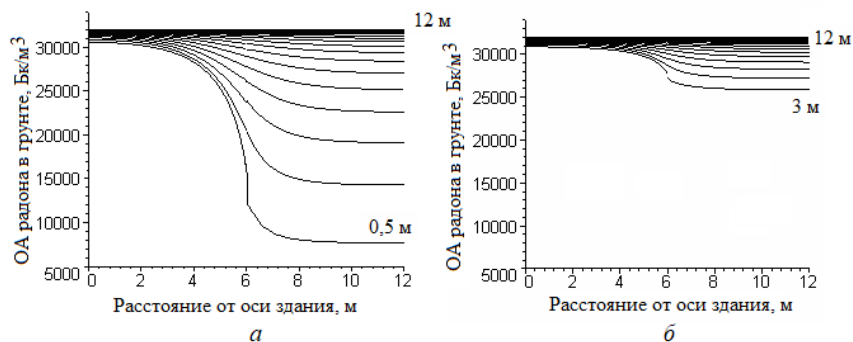


Рисунок 4.4 – Распределение концентрации радона в плоскости контакта горизонтальной ограждающей конструкции здания с грунтом и в расположенных ниже плоскостях $\{h_{гн} < y < H_y\}$ при $d = 6$ м и заглублении здания:
 а – $h_{гн} = 0,5$ м; б – $h_{гн} = 3,0$ м

Из рис. 4.4, а видно, что при небольшом заглублении здания концентрация радона в центре подошвы горизонтальной конструкции $A(0, h_{zn})$ значительно превышает концентрацию на той же горизонтальной отметке за пределами здания $A(H_x, h_{zn})$. В расположенных ниже плоскостях значения этой разности стремятся к нулю по мере увеличения глубины.

Распределение объемной активности радона по глубине под подошвой горизонтальной конструкции в сечениях $\{x = 0, h_{zn} \leq y \leq H_y\}$ и $\{x = d, h_{zn} \leq y \leq H_y\}$ при заглублении здания 0,5 м и 3,0 м приведено на рис. 4.5.

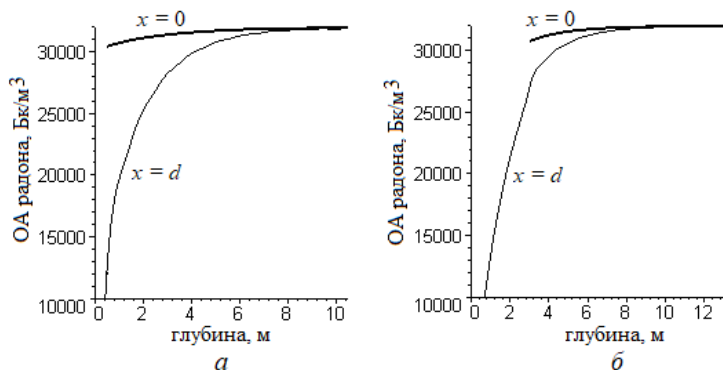


Рисунок 4.5 — Вертикальный профиль концентрации радона в грунте при заглублении здания: а — $h_{zn} = 0,5$ м; б — $h_{zn} = 3,0$ м.

Вертикальная ограждающая конструкция здания не создает препятствия для выхода радона из грунта в атмосферу. Распределение концентрации радона по глубине в плоскости контакта вертикальной конструкции с грунтом $\{A(d, y) = 0, 0 \leq y \leq h_{zn}\}$ незначительно отличается от распределения концентрации в параллельных ей плоскостях в грунте лишь при небольшом заглублении здания и практически не отличается при заглублении более 1 м.

Радоновые нагрузки на горизонтальную и вертикальную ограждающие конструкции могут быть представлены как средние значения концентрации радона на внешних границах этих конструкций

$$A_{\text{ср зор}} = \frac{1}{d} \int_{x=0}^d A(x, h_{\text{эл}}) dx, \quad (4.12)$$

$$A_{\text{ср вер}} = \frac{1}{h_{\text{эл}}} \int_{y=0}^{h_{\text{эл}}} A(d, y) dy, \quad (4.13)$$

На рис. 4.6 приведены зависимости средних концентраций радона на внешних границах подземных конструкций, нормированных на радоновый потенциал грунта

$$Z_{\text{зор}} = \frac{A_{\text{ср зор}}}{\Pi_{Rn}} \quad \text{и} \quad Z_{\text{вер}} = \frac{A_{\text{ср вер}}}{\Pi_{Rn}} \quad (4.14)$$

от конструктивных особенностей здания.

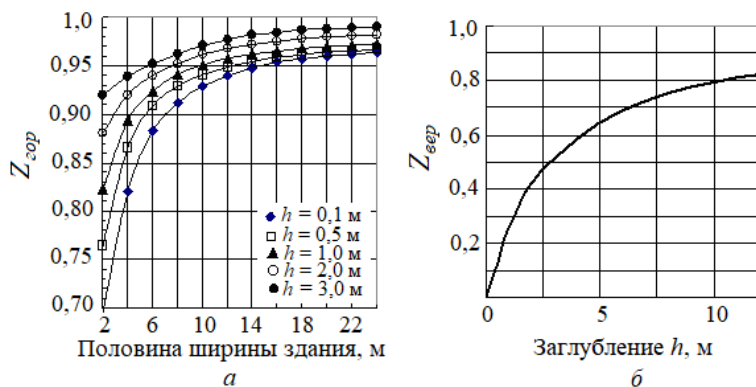


Рисунок 4.6 — Зависимость: а — величины $Z_{\text{гор}}$ от ширины и заглубления здания; б — величины $Z_{\text{вер}}$ от заглубления здания

Значение величины $Z_{\text{зор}}$ (рис. 4.6, а) может значимо зависеть от ширины и заглубления здания, в то время как значения величины $Z_{\text{вер}}$ (рис. 4.6, б) зависят от заглубления и практически не зависят от ширины здания. Особенности распределения концентрации радона в грунте при различных заглублениях зданий позволяет условно подразделить их на незаглубленные ($h \leq 1$ м), малозаглубленные

($1 \text{ м} < h < 2 \text{ м}$) и *заглубленные* ($h > 2 \text{ м}$) и подойти к определению радоновой нагрузки на их конструкции.

В большинстве практических случаев для заглубленных зданий ($d \geq 6 \text{ м}$) величина отношения $Z_{гор}$ близка к единице (рис. 4.6, а), в силу чего с достаточной для практики точностью расчетное значение радоновой нагрузки на горизонтальную ограждающую конструкцию $A_{ср гор}$ можно принять равным радоновому потенциалу грунта

$$A_{ср гор} \approx \Pi_{Rn} . \quad (4.15)$$

Для малозаглубленных и незаглубленных зданий следует использовать выражение

$$A_{ср гор} \approx Z_{гор} \cdot \Pi_{Rn} . \quad (4.16)$$

Расчетное значение радоновой нагрузки на вертикальную конструкцию $A_{ср вер}$ в соответствии с (4.13) и на основании интегрирования функции (3.11) в пределах $0 \leq x \leq h_{zл}$ при значении $Q_H = 0$ вычисляется по формуле

$$A_{ср.вер} = \left[1 - \frac{L}{h_{zл}} \operatorname{th} \left(\frac{h_{zл}}{L} \right) \right] \cdot \Pi_{Rn} \quad (4.17)$$

Формулы (4.15) — (4.17) соответствуют идеализированному представлению грунта как изотропной среды, в которой перенос радона происходит только посредством диффузии. Такое представление вполне соответствует наиболее распространенным условиям, когда грунтовое основание на глубину свыше 10 м состоит из обводненных грунтов или грунтов, не обладающих коллекторными свойствами. Для определения радоновой нагрузки на конструкции на площадках, расположенных в зонах современной активной геодинамики или содержащих грунты-коллекторы, необходимо проводить специальные исследования.

4.2. Математическое описание диффузионного переноса радона из грунта в здание

На открытой территории часть образующегося в грунте радона выделяется в приземный слой атмосферы. Количество радона, проходящего в единицу времени через единицу площади границы раздела грунта и воздуха представляет *плотность потока радона (ППР) из грунта*. Она зависит от большого числа изменчивых факторов и подвержена значительным циклическим изменениям во времени. Среднее для земной поверхности значение ППР составляет 16–20 мБк/(м²·с), экстремальные значения могут превышать 1 000 мБк/(м²·с).

Возведение здания перекрывает почвенному радону пути выхода в атмосферу и на нижней границе подземной горизонтальной ограждающей конструкции объемная активность радона в грунте увеличивается по сравнению с активностью на той же глубине в невозмущенном грунте.

Максимальная концентрация радона в почвенном воздухе называется радоновым потенциалом грунта

$$P_{Rn} = C_{Ra} \cdot \rho_{sp} \cdot k_{эм}$$

и достигается на глубине 3–7 метров в зависимости от его проницаемости. Активность радона у фундамента здания с герметичной подземной частью в среднем на 10–15 % меньше радонового потенциала грунта.

Для реализации конвективного переноса необходимо наличие в плите основания сплошных трещин и пор, соединяющих грунтовый массив с внутренним объемом здания. В домах, строящихся по современным технологиям, фундаментные плиты не имеют сквозных пор, поэтому конвективным поступлением радона можно пренебречь и рассматривать процесс формирования радоновой обстановки в здании в предположении чисто диффузионного поступления радона.

Грунтовое основание здания и опирающуюся на него ограждающую конструкцию схематично можно представить как среду, состоящую из множества слоев разнородных материалов с внутренними источниками и стоками радона (рис. 4.7). Для произвольно заданного количества слоев n и оси x , направленной перпендикулярно

их плоскостям контакта, стационарный процесс диффузионного переноса радона в среде описывается системой из n дифференциальных уравнений вида [30]:

$$D_i \cdot \frac{d^2 A_i}{dx^2} - A_i(x) \cdot \lambda + C_{Rai} \cdot \rho_i \cdot k_{эми} \cdot \lambda = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (4.18)$$

с граничными условиями

$$A_{i-1}(H_{i-1}) = A_i(H_{i-1}), \quad i = 2, 3, \dots, n, \quad (4.19)$$

$$D_i \cdot \frac{dA_i(H_{i-1})}{dx} = D_{i-1} \cdot \frac{dA_{i-1}(H_{i-1})}{dx}, \quad i = 2, 3, \dots, n, \quad (4.20)$$

$$D_1 \cdot \frac{dA_1(0)}{dx} = \alpha (A_1(0) - A_э), \quad (4.21)$$

$$D_n \cdot \frac{dA_n(H_n)}{dx} = -q_n, \quad (4.22)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$ — номер слоя в порядке следования в положительном направлении оси x ; h_i — толщина i -го слоя, м; H_i — суммарная толщина первых i слоев, $i = 1, 2, \dots, n$; $A_э = 0$ — объемная активность радона в воздухе над пористой средой, Бк/м³; $A_i(x)$ — объемная активность радона в материале i -го слоя в плоскости с данным значением x , $H_{i-1} \leq x \leq H_i$, Бк/м³; $\alpha = 0,1$ м/с — коэффициент газообмена на границе раздела «воздух — слой материала конструкции»; D_i — коэффициент диффузии радона в i -ом слое, м²/с; C_{Rai} — удельная активность радия-226 в i -ом слое, Бк/кг; ρ_i — плотность материала i -го слоя, кг/м³; $k_{эми}$ — коэффициент эманирования радона в i -ом слое; q_n — плотность потока радона в плоскости $x = H_n$, Бк/(м²·с).

Решение системы уравнений (4.18) — (4.22) для среды с произвольным числом слоев реализуется с использованием программного пакета MAPLE. На рис. 4.8, а представлены результаты вычислений, проведенных на основе данного решения для трех вариантов сочетания разнородных слоев конструкции и грунта:

- вариант *A* — открытый грунт представлен слоями глины, песка и глины мощностью 1,5 м 1,0 м и 10 м, соответственно;
- вариант *B* — на поверхности грунта расположена конструкция, состоящая из 10 см бетонной подготовки и плиты из монолитного плотного бетона толщиной 25 см;
- вариант *B* отличается от варианта *B* тем, что между бетонной подготовкой и бетонной плитой расположен слой малопроницаемого для радона материала (гидро- или газоизоляция) толщиной 4 мм.

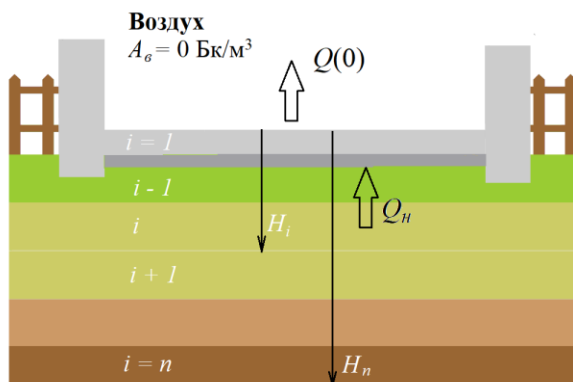


Рисунок 4.7 — Схема к системе уравнений (4.18)–(4.22)

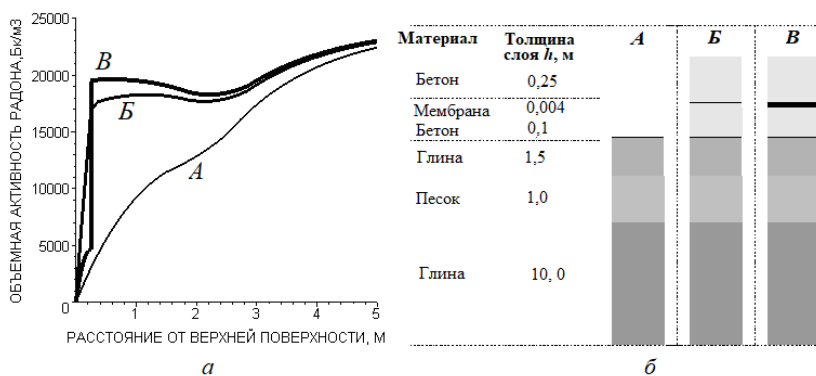


Рисунок 4.8 — Расчет объемной активности радона: *a* — распределение объемной активности радона в слоях конструкции и грунта; *б* — схема расположения слоёв

Схема расположения слоев показана на рис. 4.8, б, использованные в расчете данные о физических характеристиках материалов слоев приведены в табл. 4.2.

Согласно расчету плотность потока радона на поверхности грунта (конструкции) составляет для варианта А — 66 мБк/(м²·с), для вариантов В и В — 8 и 4 мБк/(м²·с), соответственно. Расчеты, выполняемые описанным выше способом, позволяют наглядно представить радонозащитный эффект каждого слоя и оценить его влияние на величину потока радона с поверхности верхнего слоя.

Таблица 4.2 — Расчетные значения физических характеристик слоев

Материал Величина	Бетон	Мем- брана	Бетонная подготовка	Глина	Песок	Глина
C_{Ra} , Бк/кг	20	0	20	30	10	32
ρ , кг/м ³	2200	1000	2000	1900	1700	1900
$k_{эм}$	0,25	0	0,3	0,4	0,35	0,4
h , м	0,25	0,004	0,1	1,5	1,0	10,0
D , м ² /с	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$

Аналитическое решение системы уравнений (4.18)–(4.22) для двух слоев разнородных материалов толщиной h_1 и h_2 имеет вид

$$\begin{aligned}
 A_1(x) = & \frac{W_1 \cdot \left[d \cdot sh(l_2) \cdot sh\left(\frac{x-h_1}{L_1}\right) - ch(l_2) \cdot ch\left(\frac{x-h_1}{L_1}\right) \right] + \dots}{ch(l_1) \cdot ch(l_2) + \dots} \\
 & + d \cdot \frac{[W_2 \cdot sh(l_2) - W_1 \cdot sh(l_2) + W_3] \cdot sh\left(\frac{x}{L_1}\right)}{+ d \cdot sh(l_1) \cdot sh(l_2)} + W_1, \quad 0 \leq x \leq h_1, \quad (4.23) \\
 A_2(x) = & \frac{\left\{ -W_1 \cdot \exp\left(\frac{l_1}{2}\right) \cdot \left[2sh\left(\frac{l_1}{2}\right) \cdot ch(l_1) - \exp\left(\frac{l_1}{2}\right) \cdot sh(l_1) \right] - W_2 \cdot ch(l_1) \right\}}{ch(l_1) \cdot ch(l_2) + \dots}
 \end{aligned}$$

$$\dots \frac{\cdot ch\left(\frac{x-h_1-h_2}{L_2}\right) + W_3 \cdot \left[d \cdot sh(l_1) \cdot ch\left(\frac{x-h_1}{L_2}\right) + ch(l_1) \cdot sh\left(\frac{x-h_1}{L_2}\right) \right]}{+ d \cdot sh(l_1) \cdot sh(l_2)} + W_2 ,$$

$$h_1 \leq x \leq h_2 \quad (4.24)$$

$$q_1(x) = \frac{\frac{D_1}{L_1} \left\{ W_1 \left[ch(l_2) \cdot sh\left(\frac{x-h_1}{L_1}\right) - d \cdot sh(l_2) \cdot ch\left(\frac{x-h_1}{L_1}\right) \right] + \dots \right.}{ch(l_1) \cdot ch(l_2) + \dots}$$

$$\left. + d \cdot ch\left(\frac{x}{L_1}\right) \cdot \left[W_1 \cdot sh(l_2) - W_2 \cdot sh(l_2) + W_3 \right] \right\}}{d \cdot sh(l_1) \cdot sh(l_2)} , \quad 0 \leq x \leq h_1 \quad (4.25)$$

$$q_2(x) = \frac{\frac{D_2}{L_2} \left\{ \left[W_1 \cdot \exp\left(\frac{l_1}{2}\right) \cdot \left(2sh\left(\frac{l_1}{2}\right) \cdot ch(l_1) - \exp\left(\frac{l_1}{2}\right) \cdot sh(l_1) \right) + W_2 \cdot ch(l_1) \right] \cdot \dots \right.}{ch(l_1) \cdot ch(l_2) + \dots}$$

$$\left. \left. sh\left(\frac{x-h_1-h_2}{L_2}\right) + W_3 \cdot \left[d \cdot sh(l_1) \cdot sh\left(\frac{x-h_1}{L_2}\right) + ch(l_1) \cdot ch\left(\frac{x-h_1}{L_2}\right) \right] \right\}}{d \cdot sh(l_1) \cdot sh(l_2)} ,$$

$$h_1 \leq x \leq h_2 \quad (4.26)$$

$$q_1(0) = \frac{\frac{D_1}{L_1} \{ W_1 \cdot [ch(l_2) \cdot sh(-l_1) - d \cdot sh(l_2) \cdot ch(l_1)] + d \cdot [W_1 \cdot sh(l_2) - W_2 \cdot sh(l_2) + W_3] \}}{ch(l_1) \cdot ch(l_2) + d \cdot sh(l_1) \cdot sh(l_2)}$$

$$x = 0 \quad (4.27)$$

где $q_1(x)$ и $q_2(x)$ — плотность потока радона в плоскости с координатой x , Бк/(м²·с); $L_1 = (D_1/\lambda)^{1/2}$ и $L_2 = (D_2/\lambda)^{1/2}$ — длина диффузии радона (расстояние, на котором плотность потока радона при отсутствии внешних сил уменьшается в e раз) в материале первого и второго слоя, соответственно, м.

При выводе формул (4.23) — (4.27) были введены вспомогательные величины

$$l_1 = \frac{h_1}{L_1}, \quad l_2 = \frac{h_2}{L_2}, \quad d = \frac{D_2 \cdot L_1}{D_1 \cdot L_2},$$

а концентрация радона в средах W_i , Бк/м³ определялась по формуле

$$W_1 = C_{Ra1} \cdot \rho_1 \cdot k_{эм1}; \quad W_2 = C_{Ra2} \cdot \rho_2 \cdot k_{эм2}; \quad W_3 = \frac{q_H \cdot L_2}{D_2}.$$

Для однослойной среды ($0 \leq x \leq h$) формулы (4.23)–(4.27) имеют вид

$$A(x) = q_H \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{sh\left(\frac{x}{L}\right)}{ch(l)} + W \cdot \left[1 - \frac{ch\left(\frac{x-h}{L}\right)}{ch(l)} \right], \quad (4.28)$$

$$q(x) = -q_H \cdot \frac{ch\left(\frac{x}{L}\right)}{ch(l)} - \frac{W \cdot D}{L} \cdot \frac{sh\left(\frac{h-x}{L}\right)}{ch(l)}, \quad (4.29)$$

где $L = (D/\lambda)^{1/2}$, $l = h/L$ и $W = C_{Ra} \cdot \rho \cdot k_{эм}$.

В правой части (4.29) при значении $x = 0$ первое слагаемое представляет часть потока q_{np} , которая проникает через слой

$$q_{np} = -q_H \cdot \frac{1}{ch(l)}, \quad (4.30)$$

а второе слагаемое — это плотность потока $q_{вс}$, обусловленного действием источников радона внутри слоя

$$q_{вс} = -\frac{W \cdot D}{L} \cdot th(l). \quad (4.31)$$

Входящий в слой поток q_H вследствие распада радона в процессе перемещения постепенно ослабляется. В случае последовательного

увеличения толщины слоя и (или) снижения его радонопроницаемости, величина q_{np} стремится к нулю.

Отношение m плотности проникающего через слой потока q_{np} к плотности поступающего в слой потока q_H определяется по формуле

$$m = \frac{1}{ch(l)} \cdot 100\% , \quad (4.32)$$

где параметр l представляет отношение толщины (мощности) слоя к длине диффузии радона в материале слоя.

При значениях $l > 6$, что соответствует слою наиболее проницаемого грунта толщиной 11 м, рулонного гидроизоляционного материала толщиной 4 мм или тяжелого бетона толщиной 600 мм, через слой проникает не более 0,5 % входящего в него потока (рис. 4.9).

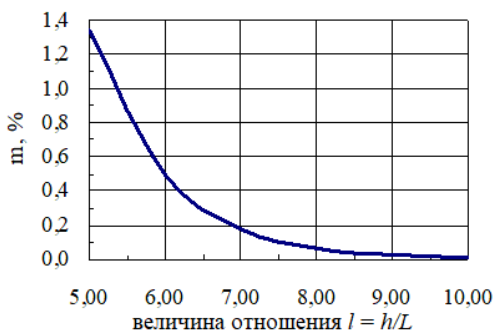


Рисунок 4.9 — Доля потока радона проникающего через слой материала в зависимости от величины параметра l

Минимальную толщину слоя грунта, при которой поток радона на его поверхности ($x = 0$) обусловлен действием источников радона внутри слоя, называют *мощностью активного слоя* $h_{акт}$ [17]. В наиболее газопроницаемых грунтах (например, сухих песках) мощность активного слоя не превышает 10 м, а в слабопроницаемых грунтах исчисляется десятками сантиметров.

Плотность потока, выделяемого в атмосферу из слоя однородного грунта мощностью $h \geq h_{акт}$, с учетом оцениваемой по (4.32)

погрешности определяется по формуле (4.31). При значениях $D \leq 7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ и $h \geq 5 \text{ м}$ значения функции $th(l) \rightarrow 1$. При этих условиях формула (4.31) может быть записана в более простом виде

$$q_{\text{вс}} \approx -W \cdot L \cdot \lambda. \quad (4.33)$$

Плотность потока радона $q_{\text{нр}}$, проникающего в здание из грунта через ограждающую конструкцию (рис. 4.10) при отсутствии в ней источников радона, можно представить в виде [20]

$$q_{\text{нр}} = K \cdot \Delta A = \Delta A / R, \quad (4.34)$$

где K — коэффициент радонопроницания конструкции, м/с; ΔA — разность объемных активностей радона на внешних поверхностях конструкции, Бк/м³; R — сопротивление радонопроницанию конструкции, с/м.

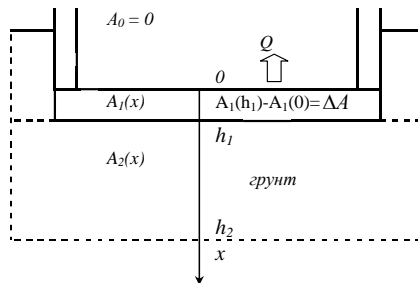


Рисунок 4.10 — Схема заглавленной части здания

Согласно (4.28) для однослойной конструкции $\Delta A = A(h) - A(0)$, а согласно (4.26) $q_{\text{нр}} = q(0)$. Для двухслойной конструкции согласно (4.23)–(4.24) $\Delta A = A_2(h_2) - A_1(0)$ и согласно (4.25) $q_{\text{нр}} = q_1(0)$. Подстановка в (4.34) соответствующих выражений ΔA и $q_{\text{нр}}$ приводит к формулам, по которым определяются сопротивления радонопроницанию однослойной $R_{1, \text{сл}}$ и двухслойной $R_{2, \text{сл}}$ конструкций

$$R_{1, \text{сл}} = \frac{L}{D} \cdot sh\left(\frac{h}{L}\right), \quad (4.35)$$

$$R_{2.ср} = ch \left(\frac{h_1}{L_1} \right) \cdot sh \left(\frac{h_2}{L_2} \right) \cdot \frac{L_2}{D_2} + sh \left(\frac{h_1}{L_1} \right) \cdot ch \left(\frac{h_2}{L_2} \right) \cdot \frac{L_1}{D_1}. \quad (4.36)$$

Сопротивление радонопроницанию представляет собой критерий радонозащитной способности ограждающей конструкции. Его величина равна разности объемных активностей радона на границах конструкции (в Бк/м³), при которой через конструкцию проникает поток радона плотностью 1 Бк/(м² с).

Формулы вида (4.36) для конструкций с числом слоев более двух имеют весьма громоздкий вид и для вычисления сопротивления радонопроницанию таких конструкций необходимо использовать специальные компьютерные программы. Вместе с тем, суммарное сопротивление радонопроницанию большинства обычно используемых конструкций определяются свойствами одного или двух основных наименее газопроницаемых слоев. Сопротивления таких вспомогательных слоев как песчаная и гравийная подсыпка, выравнивающая и защитная стяжки и т. п., в силу их высокой газопроницаемости и небольшой толщины пренебрежимо малы.

В реальных условиях концентрации радона на внутренней поверхности заглубленной конструкции (то есть, в помещении) составляет десятки Бк/м³, тогда как концентрация радона на ее внешней поверхности, находящейся в контакте с грунтом, — десятки-сотни тысяч Бк/м³ (табл. 4.2). Поэтому в данном случае допустимо принять

$$\Delta A \approx A_1(h_1) \quad (4.37)$$

где $A_1(h_1)$ — объемная активность радона в грунте на глубине закладки фундамента, Бк/м³.

Величина $A_1(h_1)$ зависит от физических характеристик грунта, а также геометрических параметров заглубленной части здания. По своему физическому смыслу она представляет величину *радоновой нагрузки* на конструкцию пола.

Как уже отмечалось выше, наряду с диффузией возможен и *конвективный перенос* радона, его поток через элементарный слой прямо пропорционален градиенту давления и коэффициенту воздухопроницаемости данного слоя

$$v = -\frac{K}{\eta} \cdot \nabla P,$$

Движущей силой конвективного поступления радона в здание выступает разность давлений на границах горизонтальной подземной ограждающей конструкции ($\sim 1-3$ Па). Чаще всего она индуцируется более низкой наружной температурой (стек-эффект), также перепад давления может создаваться ветровой нагрузкой и использованием систем вытяжной вентиляции [32]. Конвекция подразумевает перенос атомов или молекул вещества обусловленный действием внешних сил, употребляемые в литературе термины — фильтрация (перенос флюида в пористой среде), эффузия (медленное истечение газа через малые отверстия) и адвекция (перенос в горизонтальном направлении) соответствуют частным случаям действия данного механизма.

Конвективный перенос радона через подземные ограждающие конструкции может доминировать над диффузионным в случае высокой воздухопроницаемости подземной ограждающей конструкции и положительной разности давлений в почвенном газе и воздухе помещения. Высокой воздухопроницаемостью обладают сборные конструкции, сплошные монолитные конструкции со сквозными трещинами и швами, а также сборно-монолитные конструкции с незагерметизированными стыками.

Положительная разность давлений на границах конструкции всегда имеет место при более высокой (чем в грунте) температуре воздуха в здании, также она может возникать при работе в здании вытяжной вентиляции и воздействии на него ветровой нагрузки. При отсутствии перечисленных выше условий, а также отсутствии в конструкции элементов с крупными воздушными полостями, основным и постоянно действующим механизмом переноса радона из грунта в здание является диффузия.

Конвективный перенос почвенного газа в грунтах и материалах ограждающих конструкций может превалировать над диффузионным переносом только в случае:

- выхода близко к основанию здания трещиноватых горных пород, обладающих коллекторными свойствами [71];
- расположения участка застройки в зоне активной текущей микрогеодинамики и, как следствие, изменения во времени поля давления в массиве грунтов, залегающих в основании здания [47–49];

– высокой воздухопроницаемости среды переноса, превышающей 10^{-12} м², что характерно для гравиев и крупных песков или бетонных плит основания в существенно дефектном состоянии.

Радопроницаемость грунтов сильно зависит от их пористости и влажностного состояния. Насыщенные водой пласты любого грунта и плотные нетрещиноватые грунты для радона практически непроницаемы, а наиболее проницаемы сухие грунты с высокой пористостью или трещиноватостью. Радопроницаемость грунта и его пористость коррелируют между собой, однако пока не установлена универсальная зависимость между ними. Более подробно основные параметры, ответственные за формирование радоновой обстановки в здании, рассмотрены в п. 4.1.

На наиболее заселенных равнинных территориях России грунты в основании зданий чаще всего представлены самоуплотнившимися, дисперсными глинисто-песчаными осадочными породами. В них крупные воздушные полости и значимые перепады давления, необходимые для развития конвективно-фильтрационных процессов, отсутствуют. В [180] показано, что в дисперсных материалах, обладающих значительно меньшей проницаемостью, чем гравий и крупнозернистый песок, при отсутствии в них значительных структурных нарушений, основным, постоянно действующим механизмом переноса радона является молекулярная диффузия.

ГЛАВА 5

Противорадоновая защита зданий и сооружений

5.1. Цели радиационно-геологических изысканий

Радиационно-геологические изыскания на участке планируемого строительства проводят на стадии разработки проекта (рабочего проекта) здания с целью получения:

- объективных данных, свидетельствующих об отсутствии необходимости в осуществлении специальных мер по противорадоновой защите (например, в установлении факта, что нижняя отметка фундамента или конструкции пола подвала в процессе эксплуатации будет постоянно находиться в зоне водоносного слоя грунтового основания);

- исходных данных, необходимых для определения радоновой нагрузки на подземные конструкции здания, расчета поступлений радона в здание и, в случае необходимости, расчета требуемых параметров его противорадоновой защиты.

Результаты изысканий могут явиться основанием для выбора типа конструкций подземной части здания (например, отказа от ленточного фундамента в пользу сплошной фундаментной плиты).

Радиационные (радоновые) изыскания, направленные на получение исходных данных для проектирования, следует проводить в составе и совместно с инженерными геологическими изысканиями для строительства. Содержание и объем изысканий следует устанавливать в техническом задании на их проведение, предпочтительно, предусматривая возможность их корректировки в процессе изысканий.

При проведении радоновых изысканий необходимо удельную активность радия-226 в грунтовых основаниях, представленных необводненными дисперсными осадочными породами, определять в каждом из инженерно-геологических элементов разреза

на глубину не менее 10 м, а в случае их обводнения на этой глубине, до уровня первого постоянного водоносного горизонта, считая от отметки заложения подошвы фундамента. Определение удельной активности радия-226 производить при условии воздушно-сухого состояния проб грунта и установившемся в пробах радиоактивном равновесии, так как несоблюдение данных требований при гамма-спектрометрических измерениях может приводить к более, чем двукратному занижению определяемой величины.

Как отмечалось выше, признаками радоноопасности являются породы коллекторы и зоны активной микрогеодинамики. *Порода-коллектор* — горная порода, в которой вследствие наличия трещин и пустот действует сложный механизм газопереноса, при котором радон перемещается на расстояния, существенно превышающие длину диффузионного переноса. *Геодинамическая зона* — пространственно ограниченный массив горных пород, в котором вследствие текущих природных геодинамических процессов происходит цикличное изменение поля напряжения (давления), обуславливающее перемещение радона на расстояния, превышающее длину диффузионного переноса.

В случае расположения участка застройки в районе распространения грунтов, обладающих коллекторными свойствами, или зоне активной микрогеодинамики для структурного геодинамического картирования участка, определения радонового потенциала грунта и радоновой нагрузки на подземные конструкции рекомендуется проводить специальные углубленные исследования. При отсутствии возможности проведения таких исследований рекомендуется превентивное применение мер по противорадоновой защите здания.

5.2. Расчет параметров противорадоновой защиты

Расчет противорадоновой защиты производится на стадии подготовки рабочей документации проекта с использованием данных о:

– результатах проведенных на участке застройки инженерных радиационно-геологических и геологических изысканий — характеристиках, определяющих общие условия работы заглубленной части здания;

- размерах элементов подземных ограждающих конструкций и коэффициентах диффузии радона в материалах элементов — характеристиках, определяющих радонопроницаемость конструкций;
- удельной активности радия-226 и коэффициентах эманирования радона в грунтах основания здания — характеристиках, определяющих величину радоновой нагрузки на подземную часть здания;
- объемной активности радона в наружном воздухе — характеристике, определяющей минимальный, принципиально достижимый уровень активности радона во внутреннем воздухе (в случаях ведения строительства в районах с его повышенным содержанием в наружном воздухе);
- предполагаемом типе вентиляции и кратности воздухообмена в наиболее заглубленных помещениях.

При проектировании защитных мероприятий расчетные значения $ЭРОА_{расч}$ радона рекомендуется принимать:

- для зданий детских, спортивных и лечебно-оздоровительных учреждений — не более 40 Бк/м³;
- для жилых и общественных зданий — не более 70 Бк/м³.

Данные значения величины $ЭРОА_{расч}$ предложены с учетом изложенных в п. 5.1 соображений, современного состояния строительной отрасли и широкого выбора представленных на рынке высокоэффективных изоляционных материалов, а также того обстоятельства, что помимо дозы облучения радоном и его дочерними продуктами дополнительно около 10 % дозы может создаваться дочерними продуктами торона.

При проектировании противорадоновой защиты расчетная схема включает в себя грунт, граничащие с грунтом горизонтальную и вертикальные ограждающие конструкции, верхнее перекрытие, внутренние стены (рис. 5.1).

При расчете противорадоновой защиты принимаются следующие допущения:

- содержание радона в атмосферном (наружном) воздухе пренебрежимо мало;
- грунты-коллекторы радона в основании здания отсутствуют;
- вклад внутренних источников радона (воды и природного газа) в общее поступление радона пренебрежимо мал;
- площадь застройки расположена вне зоны текущей активной геодинамики;

- конвективные поступления радона из грунта в здание вследствие превентивно принятых мер пренебрежимо малы;
- поступления радона в здание из грунта через заглубленные ограждающие конструкции и кратность воздухообмена могут регулироваться.

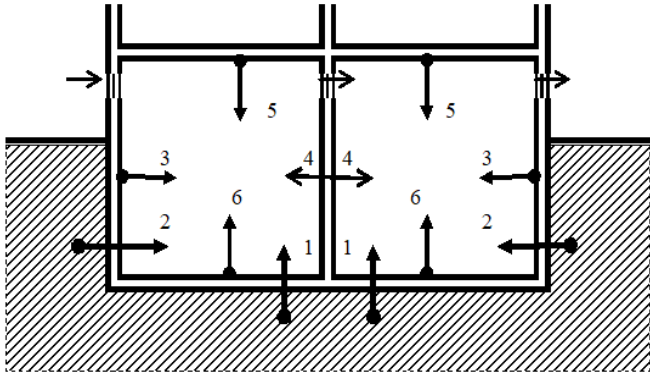


Рисунок 5.1 — Расчетная схема здания и источники поступлений радона: 1 — грунтовое основание; 2 — грунт, примыкающий к фундаментным стенам; 3, 4 — продольные и поперечные фундаментные стены, 5 — перекрытие, 6 — конструкция опирающегося на грунт пола

Цель расчета заключается в оценке соответствия ожидаемого (прогностического) значения эквивалентной равновесной объемной активности радона во внутреннем воздухе наиболее заглубленных помещений здания $ЭРОА_{прог}$ заданному расчетному значению $ЭРОА_{расч}$ в случае реализации первоначально предполагаемого проектного решения подземных ограждающих конструкций:

$$ЭРОА_{прог} \leq ЭРОА_{расч} \cdot \quad (5.1)$$

В соответствии с (3.18), с учетом принятых допущений и показанных на рис. 5.1 обозначений источников, прогнозируемое значение $ЭРОА$ радона в помещении вычисляется по формуле

$$ЭРОА_{прог} = \frac{Q_{пр.1} \cdot S_1 + Q_{пр.2} \cdot S_2 + \sum_{i=3}^8 Q_i \cdot S_i}{V \cdot (\lambda + n)} \cdot F, \quad (5.2)$$

где $Q_{np.1}$ и $Q_{np.2}$ — плотность потока радона, проникающего из грунта через горизонтальную и вертикальную ограждающие конструкции, соответственно, Бк/(м²·с); S_1 и S_2 — площади внутренних поверхностей горизонтальной и вертикальных ограждающих конструкций, соответственно, м²; Q_i — плотность потока радона, поступающего в помещение вследствие выделения радона в материале i -ой ограждающей конструкции ($i = 3, 4, \dots, 8$), Бк/(м²·с); S_i — площадь внутренней поверхности i -ой ограждающей конструкции, м².

Приближенное среднее значение плотности потока радона, поступающего в помещения вследствие его выделения в материалах конструкций, с достаточной степенью точности может быть принято равным 2,5 мБк/(м²·с) [18; 99]. Более точно плотности потоков могут быть рассчитаны:

– для внутренних конструкций по формуле

$$q_i = \frac{C_i \cdot \rho_i \cdot k_i \cdot D_i}{L_i} \cdot th\left(\frac{h_i}{2L_i}\right), \quad (5.3)$$

– для наружных конструкций по формуле

$$q_i = \frac{C_i \cdot \rho_i \cdot k_i \cdot D_i}{L_i} \cdot th\left(\frac{h_i}{L_i}\right), \quad (5.4)$$

где C_i , ρ_i , k_i , D_i , L_i и h_i — физические характеристики основного слоя i -ой конструкции.

Справочные значения коэффициентов эманирования радона в строительных материалах приводятся в табл. 5.1.

Таблица 5.1 — Коэффициенты эманирования радона в стройматериалах [34]

Материалы	$k_{эм}$
Бетон тяжелый	0,11
Кирпич красный	0,015
Кирпич силикатный	0,10
Гипс строительный	0,044
Туф	0,014

Значения $q_{np,1}$ и $q_{np,2}$ вычисляются по формулам:

– для горизонтальной конструкции (пола подвала или подполья)

$$q_{np,1} = \frac{A_{cp,гор}}{R_{гор}}, \quad (5.5)$$

– для вертикальной конструкции

$$q_{np,2} = \frac{A_{cp,вер}}{R_{вер}}, \quad (5.6)$$

где $R_{гор}$ и $R_{вер}$ — сопротивления радонопроницанию горизонтальной и вертикальной конструкций, соответственно, с/м; $A_{гор}$ и $A_{вер}$ — расчетные значения объемной активности радона на внешних поверхностях горизонтальной и вертикальной конструкций, соответственно, определяемые по формулам (3.15)–(3.17).

Входящее в (3.15)–(3.16) значение Π_{Rn} вычисляется для максимальных, определенных при проведении инженерных изысканий, значений $C_{зр}$ и $\rho_{зр}$, для залегающих в основании здания:

– необводненных грунтов на глубину до 3 м;

– обводненных на глубине менее 3 м грунтов на глубину верхней отметки первого постоянного водоносного горизонта.

Справочные значения коэффициентов эманирования радона в грунтах приводятся в табл. 5.2. Значения сопротивлений радонопроницанию $R_{гор}$ и $R_{вер}$ для конструкции с одним расчетным слоем вычисляются по формуле (4.32), с двумя расчетными слоями — по формуле (4.33).

Суммарное сопротивление радонопроницанию конструкции с количеством расчетных слоев более двух приближенно (с незначительным занижением определяемой величины) можно рассчитать по формуле:

$$R = R_i + R_{i+1} + \dots R_n, \quad (5.7)$$

где R_i — сопротивление радонопроницанию i -го слоя конструкции, определяемое по формуле (2.24); $i = 1, 2, \dots, n$ — порядковый номер слоя.

Таблица 5.2 — Коэффициенты эманирования радона в грунтах

Литолого-генетический тип породы	$k_{эм}$
Глины покровные четвертичные (gr Q II-III)	0,45
Глины среднеюрского периода (J2 bt+cl)	0,45
Глины юрского периода оксфордского яруса (J3 oxf)	0,6
Глины каменноугольного периода (C2–3)	0,5
Пески аллювиальные и флювиогляциальные (aQIII-IY, fIQII)	0,45
Суглинки моренные (gQII d,m)	0,35
Мергели четвертичные (lm,bQIII)	0,6
Известняки каменноугольного периода (C2–3)	0,2
Песчаники среднеюрского периода (J2 bt+cl)	0,1
Пески пылеватые и глинистые	0,15
Конгломераты	0,15

Значения коэффициентов диффузии радона и длины диффузии радона в строительных материалах приводятся в табл. 5.3.

Таблица 5.3 — Коэффициент и длина диффузии радона в стройматериалах

Материал	Толщина слоя, мм	D , м ² /с	L , мм
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Бетон по ГОСТ 26633–91 класса не ниже В20 на цементном связующем и тяжелом заполнителе, армированный ^{1, 2}	100	$1,1 \cdot 10^{-7}$	229
	150	$7,5 \cdot 10^{-8}$	189
	200	$5,3 \cdot 10^{-8}$	159
	250	$3,7 \cdot 10^{-8}$	133
	300	$2,9 \cdot 10^{-8}$	118
	350	$2,4 \cdot 10^{-8}$	107
	400	$2,0 \cdot 10^{-8}$	98
	450	$1,8 \cdot 10^{-8}$	93
	500	$1,7 \cdot 10^{-8}$	90
	550	$1,6 \cdot 10^{-8}$	87
≥ 600	$1,5 \cdot 10^{-8}$	85	

Материал	Толщина слоя, мм	D , $\text{м}^2/\text{с}$	L , мм
I	2	3	4
Битум дорожный по ГОСТ 22245–76 и строительный по ГОСТ 6617–76 модифицированный	$1 \cdot 10^{-10}$		2
Полимерно-битумное вяжущее (ПБВ) ²	$1 \cdot 10^{-10}$		2
Покрытие напыляемое эластомерное на основе поликарбамида «Экстраплан 502» по ТУ 5772–081–10861980–2006	$6,1 \cdot 10^{-11}$		5
Кровельный и гидроизоляционный рулонный наплавляемый битумно-полимерный водостойкий ТЕХНОЭЛАСТ по ТУ 5774–003–00287852–99	$1,3 \cdot 10^{-10}$		8
Гидро-газоизоляционный рулонный наплавляемый битумно-полимерный ТЕХНОЭЛАСТ-АЛЬФА по ТУ 5774–041–17925162–2006	$9 \cdot 10^{-11}$		7
Гидроизоляционный на основе гибкого поливинилхлорида (PVC-P), полипропилена (PP), полиуретана (PU), этилен-пропилен-диен-мономера (EPDM), битума модифицированного сополимером этилена (ECB) ²	менее $2,5 \cdot 10^{-10}$		< 11
Мембрана DELTA-THENE на основе полиэтилена низкой плотности (LDPE)	$4,4 \cdot 10^{-11}$		0,005
Мембрана на основе пластифицированного поливинилхлорида: «LOGICROOF T-SL» по ТУ 5774–001–56818267–2005, «ПЛАСТ-ФОИЛ-U» по ТУ 5774–004–80678383–2008.	$5,5 \cdot 10^{-11}$		0,005
Полимербетон по СН 525–80 ²	менее $1 \cdot 10^{-12}$		< 1
Покрытие из напыляемой битумно-латексной эмульсии ²⁾	менее $3 \cdot 10^{-10}$		< 12
Рулонный на основе полиэтилена высокой плотности ²⁾	$0,8 \cdot 10^{-11}$		2
Воздух	$1,1 \cdot 10^{-5}$		2182
Вода	$2,4 \cdot 10^{-9}$		31,6

Примечания: ¹ Для воздушно-сухого бетона с учетом влияния усадочных микротрещин;

² Справочные значения

Справочные значения сопротивлений радонопроницанию конструкций из сплошного монолитного слоя бетона без гидрогазоизолирующей мембраны и слоя бетона в сочетании с мембраной приводятся в табл. 5.4.

Таблица 5.4 — Сопротивления радонопроницанию

Материал	Толщина слоя бетона δ , мм	R , с/м	
Монолитный армированный плотный товарный бетон ¹ класса не ниже В20 на цементном связующем и тяжелом заполнителе без гидро-газоизоляции	100	$9,38 \cdot 10^5$	
	150	$2,22 \cdot 10^6$	
	200	$4,85 \cdot 10^6$	
	250	$1,15 \cdot 10^7$	
	300	$2,59 \cdot 10^7$	
	350	$5,87 \cdot 10^7$	
	400	$1,30 \cdot 10^8$	
	450	$3,07 \cdot 10^8$	
	500	$6,86 \cdot 10^8$	
	550	$1,49 \cdot 10^9$	
	≥ 600	$3,41 \cdot 10^9$	
Монолитный армированный плотный товарный бетон класса не ниже В20 на цементном связующем и тяжелом заполнителе в сочетании с гидрогазоизолирующей мембраной	Толщина, мм	<i>A</i>	<i>B</i>
	100	$3,50 \cdot 10^7$	$4,45 \cdot 10^8$
	150	$4,37 \cdot 10^7$	$5,43 \cdot 10^8$
	200	$6,42 \cdot 10^7$	$7,79 \cdot 10^8$
	250	$1,17 \cdot 10^8$	$1,38 \cdot 10^9$
	300	$2,28 \cdot 10^8$	$2,66 \cdot 10^9$
	350	$4,74 \cdot 10^8$	$5,47 \cdot 10^9$
	400	$1,09 \cdot 10^9$	$1,25 \cdot 10^{10}$
	450	$2,36 \cdot 10^9$	$2,68 \cdot 10^{10}$
	500	$4,76 \cdot 10^9$	$5,38 \cdot 10^{10}$
	550	$1,01 \cdot 10^{10}$	$1,13 \cdot 10^{11}$
	≥ 600	$2,25 \cdot 10^{10}$	$2,52 \cdot 10^{11}$

В процессе выполнения расчетов коэффициент диффузии радона в бетоне был принят в соответствии с табл. 5.3, а коэффициент диффузии радона в материале гидро-газоизолирующего слоя принимался равным: *A* — $1 \cdot 10^{-10}$ м²/с, *B* — $1 \cdot 10^{-11}$ м²/с, толщина слоя — 3 мм.

В случае невыполнения условия (5.1) необходимо снизить до допустимого значения поступления радона через конструкцию,

вносящую наибольший вклад в суммарные поступления. Как правило, целесообразным оказывается снижение поступлений через горизонтальную конструкцию.

Допустимое значение $q_{np.1.\dot{d}on}$, при прочих равных условиях, вычисляется по формуле

$$q_{np.1.\dot{d}on} = \frac{\text{ЭРОА}_{расч} \cdot V \cdot (\lambda + n) - \left(\sum_{i=3}^8 q_i \cdot S_i + q_{np.2} \cdot S_2 \right) \cdot F}{S_1 \cdot F}. \quad (5.8)$$

Требуемое для выполнения условия $q_{np.1} \leq q_{np.1.\dot{d}on}$ сопротивление радонопроницанию конструкции $R_{\dot{c}op.mp}$ определяется по формуле

$$R_{\dot{c}op.mp} = \frac{A_{\dot{c}p.\dot{c}op}}{q_{np.1.\dot{d}on}}. \quad (5.9)$$

Для выполнения условия $\text{ЭРОА}_{прог} \leq \text{ЭРОА}_{расч}$ требуется, чтобы плотность проникающего в помещение из грунта потока радона q_n не превышала допустимой величины $q_{n.\dot{d}on}$, которая вычисляется по формуле

$$q_{n.\dot{d}on} = \frac{\text{ЭРОА}_{расч} \cdot V \cdot (\lambda_{Rn} + n_o) - \sum_{i=1}^{i=6} q_i \cdot S_i \cdot F}{S_n \cdot F}, \quad (5.10)$$

Справочные значения величин $q_{n.\dot{d}on}$, рассчитанные для модели помещения размером 6×6×3 м в зависимости от кратности воздухообмена и заданного значения $\text{ЭРОА}_{расч}$, приводятся в табл. 5.5.

Требуемое для выполнения условия $q_n \leq q_{n.\dot{d}on}$ значение сопротивления радонопроницанию горизонтальной конструкции R_{mp} определяется по формуле:

$$R_{mp} = \frac{\Pi_{Rn}}{q_{n.\dot{d}on}}. \quad (5.11)$$

Фактическое сопротивление радонопроницанию проектируемой конструкции R должно быть не менее величины R_{mp} .

Таблица 5.5 – Допустимые значения величины $q_{п.доп}$ мБк/(м²·с)

Кратность воздухообмена n_0 , ч ⁻¹	$ЭРОA_{расч}$, Бк/м ³			
	30	40	50	60
0,2	-	1	3	6
0,3	3	7	11	16
0,4	8	14	20	26
0,5	14	22	30	38
0,6	21	31	41	51
0,7	28	40	53	66
0,8	36	51	66	81
0,9	52	73	93	114
1,0	71	98	125	152

Вычисленные для различных значений радонового потенциала грунта значения R_{mp} , при которых значения q_n не превышают 5 и 10 мБк/(м²·с), приводятся в табл. 5.6.

Таблица 5.6 – Требуемое сопротивление радонопроницанию конструкции

P_{Rn} , кБк/м ³	R_{mp} , с/м	
	при $q_n \leq 5$ мБк/(м ² ·с)	при $q_n \leq 10$ мБк/(м ² ·с)
10	$2 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^6$
20	$4 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$
30	$6 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$
40	$8 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^6$
50	$1 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^6$
60	$1,2 \cdot 10^7$	$6 \cdot 10^6$
70	$1,4 \cdot 10^7$	$7 \cdot 10^6$
80	$1,6 \cdot 10^7$	$8 \cdot 10^6$
90	$1,8 \cdot 10^7$	$9 \cdot 10^6$
100	$2,0 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$
110	$2,1 \cdot 10^7$	$1,1 \cdot 10^7$
120	$2,4 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^7$
130	$2,6 \cdot 10^7$	$1,3 \cdot 10^7$
140	$2,8 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^7$
150	$3,0 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^7$

В *Приложении 2* представлен пример определения величины $R_{тр}$ для заданных расчетных условий.

Следует заметить, что универсального метода проектирования противорадоновой защиты зданий, оптимальной для любых условий строительства, на данный момент не существует. Его отсутствие предопределяет возможность реализации проектных решений с недостаточной или избыточной защитой. В случаях, когда эффективность проектируемых радонозащитных мероприятий не поддается однозначной оценке, рекомендуется прибегать к научно-технической поддержке компетентных организаций, ведущих исследования в рассматриваемой области.

5.3. Принципы противорадоновой защиты зданий

Противорадоновая защита — система мер по обеспечению безопасной радоновой обстановки в помещениях, которая базируется на следующих принципах:

- предотвращение (или минимизация) возможного поступления радона в здание из основных его источников;
- минимальная, требуемая по соображениям радонобезопасности, вентиляция помещений наружным воздухом с низким содержанием радона.

Основными источниками поступлений радона в помещения (как было показано выше) являются: грунтовое основание здания (доминирующий источник), материалы ограждающих конструкций и наружный воздух.

Основные механизмы переноса радона от источника в помещение:

- диффузия, обусловленная разностью концентраций радона в источнике и в воздухе помещения;
- конвекция, обусловленная разностью плотностей смеси газов в источнике и в помещении.

Предотвращение *конвективного переноса* является первоочередным, но недостаточным условием противорадоновой защиты и достигается посредством применения обладающих длительной трещиностойкостью узлов и конструкций, уплотнения (герметизации) стыков и швов между элементами конструкций. *Диффузионный перенос* подавляется путем применения в конструкции

материалов с низкими значениями коэффициента диффузии радона. Предпочтительны такие проектные решения, где в узлах сопряжения горизонтальных и вертикальных конструкций (например, бетонной плиты подвального пола с цокольной стеной), отсутствуют щели, совпадающие по своему направлению с направлением переноса радона из грунта в здание (рис. 5.2).

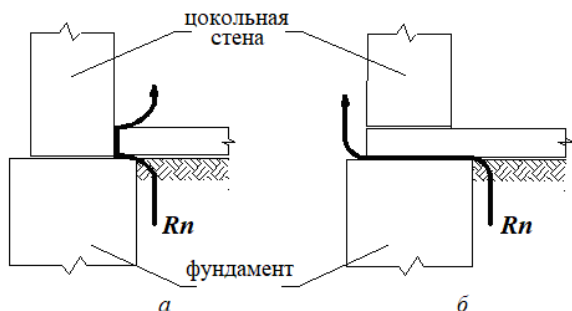


Рисунок 5.2 — Узлы сопряжения ограждающих конструкций: а — нежелательно; б — предпочтительно

Основной принцип противорадоновой защиты заключается в предохранении здания от поступлений радона из основных источников и, одновременно, вентиляции помещений. При любых обстоятельствах вентиляция наружным воздухом помещений для длительного пребывания людей является обязательным условием радонобезопасности. Необходимая по соображениям противорадоновой защиты кратность воздухообмена зависит от величины суммарных поступлений радона в помещение от всех источников. При небольших поступлениях, например, только от внутренних ограждающих конструкций, но очень низкой кратности воздухообмена, концентрация радона во внутреннем воздухе может намного превысить нормированный уровень (рис. 5.3). Поэтому во всех случаях, когда ограждающие конструкции здания выполнены из материалов на основе нерудных горных пород, кратность воздухообмена в защищаемом помещении должна быть не менее $0,15 \text{ ч}^{-1}$.

Следует стремиться к тому, чтобы суммарные поступления радона в помещение от всех источников не превышали величины, при которой необходимая по соображениям противорадоновой защиты кратность воздухообмена не превышала минимальной

кратности воздухообмена, требуемой санитарными нормами. Необходимость более интенсивной вентиляции с целью удаления радона из помещений свидетельствует о низком уровне противорадоновой защиты.

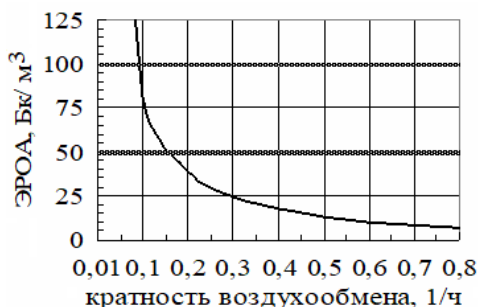


Рисунок 5.3 — Зависимость ЭРОА радона в воздухе помещения от кратности воздухообмена (для помещения $6 \times 5 \times 3$ м, удельные поступления радона от всех внутренних поверхностей ограждающих конструкций приняты равными $2,5$ МБк/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$))

Современные здания должны удовлетворять комплексу приоритетных требований по обеспечению их устойчивости, пожарной безопасности, сейсмостойкости, долговечности и т. п. Радонобезопасность здания не должна обеспечиваться в ущерб принятой концепции проекта и выполнению приоритетных требований.

В целом *противорадоновая защита здания* — это система вспомогательных технических мероприятий, реализуемых при проектировании его ограждающих конструкций и узлов их сопряжения, системы отопления, вентиляции, канализации, тепло-, электро- и водоснабжения. Неудачное решение одного из элементов такой системы, осуществленное без учета радонового фактора, может привести к созданию неблагоприятной радоновой обстановки во всем здании.

При проектировании подземных ограждающих конструкций предпочтительны решения, в которых основные функции элементов конструкций одновременно выполняют функцию противорадоновой защиты. Например, совмещены функции гидроизоляции и радонозащитной мембраны или фундаментной плиты и радонозащитного барьера.

Радонозащитная способность ограждающих конструкций в решающей степени зависит от качества строительных работ. Использование некачественных материалов и нарушения технологии их применения могут свести к нулю эффективность защиты. В процессе строительства все скрытые работы, связанные с осуществлением противорадоновой защиты, целесообразно оформлять соответствующими актами приемки работ.

Радонозащитные мероприятия, реализуемые в процессе строительства здания, всегда требуют меньших затрат, чем после его завершения. В некоторых случаях затраты на превентивно принятые меры защиты могут быть ниже затрат на проведение изысканий или на обоснование нецелесообразности защиты от радона.

Современное состояние проблемы противорадоновой защиты зданий в РФ характеризуется еще недостаточной изученностью ряда ее аспектов, отсутствием соответствующих положений строительных Норм и Правил проектирования, недостаточной осведомленностью многих специалистов изыскательских и проектных организаций в сущности проблемы. В связи с этим в ряде случаев остается целесообразным проведение специализированной экспертизы проектов противорадоновой защиты в организациях, ведущих системные исследования в данной области.

5.4. Технические решения защиты от радона

Противорадоновая защита здания может реализовываться посредством пассивных или активных технологий. *Пассивная защита* заключается в повышении сопротивления узлов и элементов ограждающих конструкций переносу радона от источника в помещение. Пассивная защита не требует обслуживания и эксплуатационных затрат, ее элементы, как правило, многофункциональны. Основным недостатком пассивной защиты — это ее ремонтнепригодность.

Активная защита заключается в снижении радоновой нагрузки на подземную часть здания или удалении насыщенного радоном воздуха из помещения посредством специального оборудования. Активная защита управляема и наиболее эффективна при высоких уровнях радоновой нагрузки. Однако, она требует регулярных затрат на обслуживание и потребляемую электроэнергию.

5.4.1. Пассивные технологии защиты зданий от радона

Основным типом пассивных технических решений противорадоновой защиты является барьер.

Барьер — несущая (или самонесущая) плоская конструкция (или элемент конструкции) из малопроницаемого для радона материала (рис. 5.4). Барьер может быть сплошным в пределах площади здания или фрагментированным. Сплошная монолитная железобетонная фундаментная плита представляет собой эффективный и наиболее часто используемый вариант барьера. Толщина фундаментной плиты определяется из соображений ее требуемой несущей способности и может составлять от 200 мм до двух и более метров.

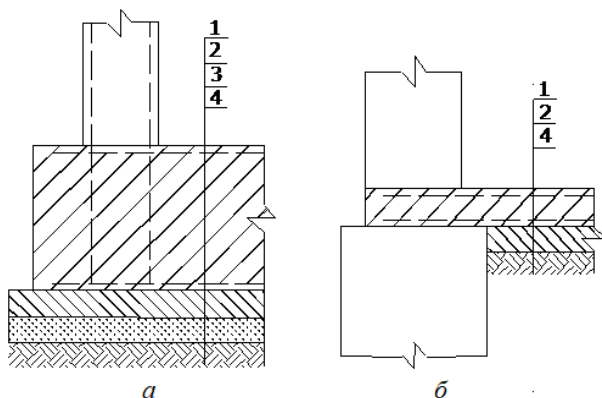


Рисунок 5.4 — Конструкции барьеров: а — барьер в виде сплошной фундаментной плиты; б — барьер в виде сплошной плиты пола; 1 — монолитный железобетон; 2 — подготовка из тощего бетона; 3 — песчаная подсыпка; 4 — уплотненный грунт

Фундаментные плиты изготавливают из тяжелого плотного бетона класса не ниже В20, марки не ниже W4. С увеличением толщины плиты ее сопротивление переносу радону из грунта в здание возрастает (рис. 5.5).

При этом лишь незначительно возрастают поступления в здание радона, выделяемого в теле плиты. Обычно они составляют около $2,5 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, а максимальная величина не превышает $5 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Фундаментная плита толщиной более 400 мм обладает достаточным для большинства случаев, возрастающим при

повышении плотности бетона, сопротивлением радонопроницанию. При использовании плит меньшей толщины могут потребоваться дополнительные меры понижения радонопроницаемости конструкции [19; 23; 25].

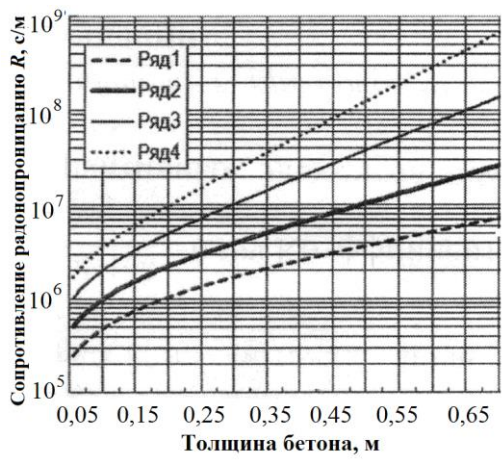


Рисунок 5.5 — Сопротивление радонопроницанию материалов бетонной плиты. Ряды: 1 — $D = 2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 — $D = 1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; 3 — $D = 5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$; 4 — $D = 3 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$

При строительстве малоэтажных зданий с относительно небольшой общей площадью барьер устраивают в виде сплошной фундаментной плиты переменного сечения (рис. 5.6).

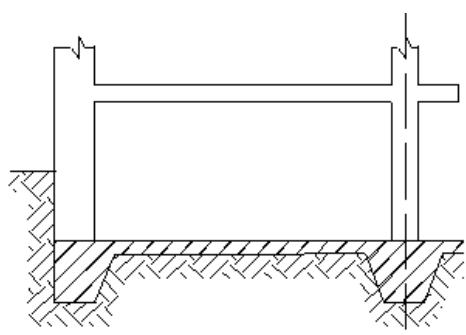


Рисунок 5.6 — Барьер в виде сплошной фундаментной плиты переменного сечения

Фрагментированный барьер состоит из монолитных бетонных плит пола подвала (технического подполья), опирающихся на грунтовую подсыпку (плавающая плита) или по периметру на ленточный фундамент (ростверк). При этом каждая из плит располагается в пространстве, ограниченном внутренними контурами фундаментных или цокольных стен. Толщина плит обычно составляет от 100 до 200 мм. При использовании фрагментированных барьеров необходима защита от конвективного переноса радона из грунта в здание через щели в узлах стыковки бетонных плит с фундаментом и (или) стенами (рис. 5.7).

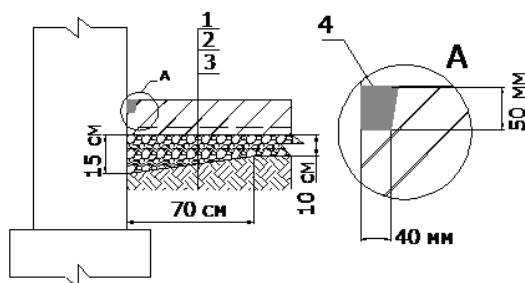


Рисунок 5.7 — Фрагментированный барьер в виде плавающей плиты пола: 1 — монолитный, армированный дорожной сеткой бетон; 2 — слой щебня, пролитый расплавленным битумом до полного насыщения; 3 — уплотнённый грунт; 4 — заполненная расплавленным битумом штроба глубиной 50 мм, шириной 50/40 мм

На рис. 5.8 и 5.9 показаны радононепроницаемые узлы сопряжения плиты пола с цокольной панелью, опирающейся на незамкнутый по периметру здания ростверк.

При устройстве бетонных барьеров особое внимание следует уделять обеспечению их трещиностойкости и минимизации пористости бетона. Вероятность образования трещин возрастает с уменьшением толщины барьера. Образование в нем сквозных усадочных и осадочных трещин не допускается. Для предотвращения образования трещин и повышения прочности бетонного барьера рекомендуется использовать современные технологии изготовления и укладки бетона, в частности:

- укладку бетонной смеси производить по пятисантиметровой увлажненной песчаной подсыпке или по бетонной подготовке;

– слой бетона толщиной менее 200 мм армировать дорожными сетками из арматуры класса Вр-1 диаметром 5–6 мм с размером ячеек 100×100 или 150×150 мм;

– использовать бетон с минимальным водоцементным отношением и повышающими трещиностойкость добавками, фибробетон или бетон на напрягающих цементах.

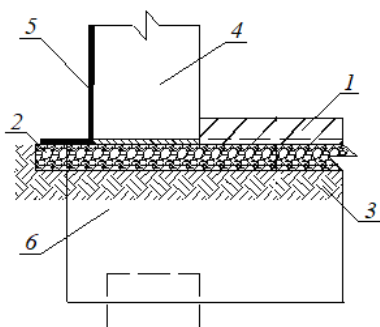


Рисунок 5.8 — Фрагментированный барьер в виде опирающейся на поперечные балки ростверка плиты пола: 1 — монолитный, армированный дорожной сеткой бетон; 2 — слой щебня, пролитый расплавленным битумом до полного насыщения; 3 — уплотнённый грунт; 4 — наружная цокольная панель опирающаяся углами на балки ростверка; 5 — гидроизоляция из обмазочного или рулонного материала; 6 — поперечная балка незамкнутого по периметру ростверка

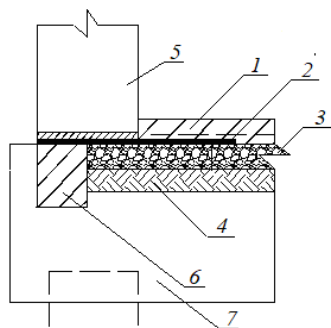


Рисунок 5.9 — Фрагментированный барьер в виде опирающейся на ростверк и продольную балку плиты пола: 1 — монолитный, армированный дорожной сеткой бетон; 2 — полоса рулонного гидроизоляционного материала; 3 — слой щебня, пролитый расплавленным битумом до полного насыщения; 4 — уплотнённый грунт; 5 — наружная цокольная панель; 6 — дополнительная продольная балка ростверка; 7 — поперечная балка ростверка

При бетонировании по песчаной подсыпке толщина плиты должна составлять не менее 17 см, по подготовке из тощего бетона — не менее 10 см. Перед укладкой бетонной смеси на песчаный или гравийный (щебеночный) слой его поверхность целесообразно покрыть полиэтиленовой пленкой толщиной не менее 0,2 мм. Свежеуложенный бетон должен тщательно уплотняться, а бетонирование следует производить с минимальным числом технологических швов, предпочтительно — в одну смену.

Наиболее высокими надежностью и защитными свойствами обладают конструкции, в которых используется сочетание барьера с радонозащитной мембраной (рис. 5.10–5.14).

Мембрана — сплошной тонкий слой малопроницаемого для радона рулонного или листового материала [52–53].

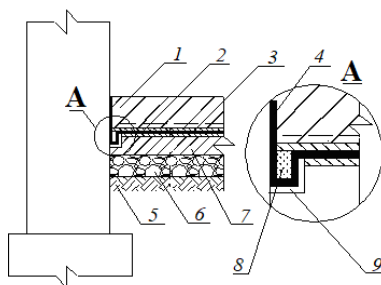


Рисунок 5.10 — Сочетание фрагментированного барьера с мембраной: 1 — монолитный, армированный дорожной сеткой бетон; 2 — защитный слой; 3 — рулонный гидроизоляционный материал; 4 — выравнивающая стяжка; 5 — подготовка из тощего бетона; 6 — щебень; 7 — уплотнённый грунт; 8 — сухой песок, пенопласт; 9 — штроба 50×50 мм (гидроизоляционный материал в штробе не фиксируется)

Мембрана располагается выше или ниже несущего элемента ограждающей конструкции, повышает ее общее сопротивление радонопроницанию и служит защитой от проникновения грунтового радона в здание через поры, трещины и стыки в элементах конструкции. Гидроизолирующие слои конструкции обычно одновременно выполняют функцию радонозащитной мембраны.

Для устройства мембран используют наплавливаемые или приклеиваемые армированные стеклотканью рулонные гидроизоляционные материалы на модифицированной битумно-полимерной основе, пленочные и тонколистовые материалы на полимерной основе или профилированные геомембраны на полимерной основе.

При устройстве радонозащитной мембраны необходимо обеспечивать ее сплошность в пределах площади здания исключая возможность ее механического повреждения в процессе строительства. Следует предусмотреть возможность упругопластической деформации мембраны без разрушения при подвижках несущей конструкции и смещении элементов конструкции относительно друг друга в процессе эксплуатации здания.

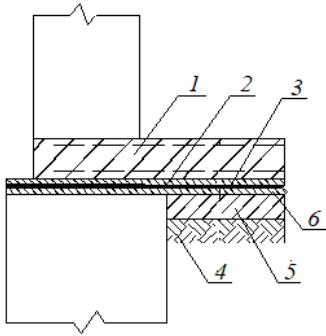


Рисунок 5.11 — Сочетание сплошного барьера с мембраной: 1 — монолитный железобетон; 2 — защитный слой; 3 — рулонный гидроизоляционный материал; 4 — выравнивающая стяжка; 5 — подготовка из тощего бетона; 6 — уплотнённый грунт

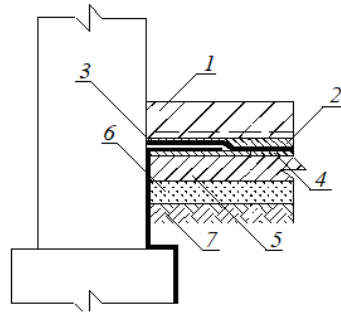


Рисунок 5.12 — Сочетание фрагментированного барьера с мембраной: 1 — монолитный, армированный дорожной сеткой бетон; 2 — защитный слой; 3 — рулонный гидроизоляционный материал; 4 — выравнивающая стяжка; 5 — подготовка из тощего бетона; 6 — песчаная подсыпка; 7 — уплотнённый грунт

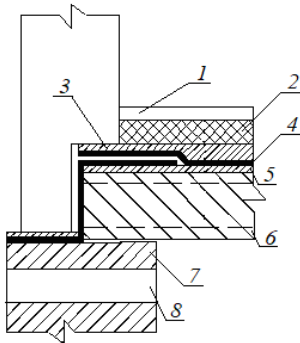


Рисунок 5.13 — Сочетание сборного железобетонного перекрытия с мембраной: 1 — чистый пол; 2 — теплоизоляция; 3 — защитный слой; 4 — рулонный гидроизоляционный материал; 5 — выравнивающая стяжка; 6 — плита перекрытия; 7 — подполье; 8 — вентиляционный проход в цоколе

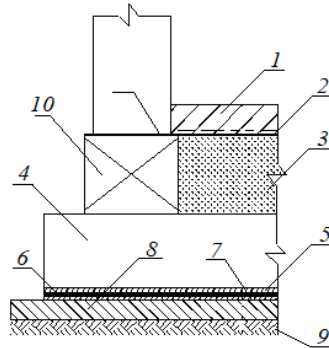


Рисунок 5.14 — Сочетание фрагментированного и сплошного барьеров с мембраной: 1 — монолитный, армированный дорожной сеткой бетон; 2 — полимерная пленка; 3 — песчаная подсыпка; 4 — монолитный железобетон; 5 — защитный слой; 6 — рулонный гидроизоляционный материал; 7 — выравнивающая стяжка; 8 — подготовка из тощего бетона; 9 — уплотнённый грунт; 10 — фундаментный блок

При покрытии несущей конструкции наплавленным или приклеиваемым рулонным материалом образование воздушных полостей между материалом и конструкцией не допускается. Во избежание разрывов и проколов мембрана должна наноситься на выровненную поверхность и покрываться защитным слоем. Выравнивающий и защитный слой (стяжку) устраивают толщиной не менее 20 мм из цементно-песчаного раствора класса не ниже В12,5. Кромки полос материала мембраны должны перекрываться внахлест не менее чем на 15 см. Устройство мембраны может производиться в один или два-три этапа, на рис. 5.15–5.16 показан вариант поэтапного устройства мембраны — частично до возведения стен и после.

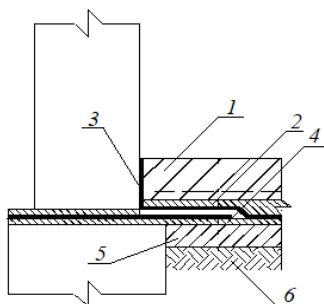


Рисунок 5.15 — Сочетание фрагментированного барьера с поэтапно устраиваемой мембраной: 1 — монолитный, армированный дорожной сеткой бетон; 2 — защитный слой; 3 — рулонный гидроизоляционный материал; 4 — выравнивающая стяжка; 5 — подготовка из тощего бетона; 6 — уплотненный грунт

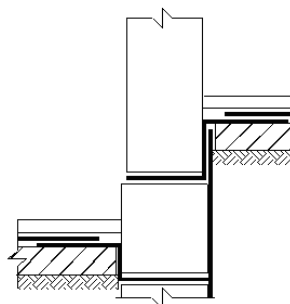


Рисунок 5.16 — Схема поэтапно устраиваемой мембраны при перепаде отметок пола

На первом этапе при завершении нулевого цикла работ (рис. 5.15) производится выравнивание поверхности фундамента и бетонной подготовки с последующим укреплением полос изоляционного материала по осям стен и перегородок. Ширина полос должна быть не менее чем на 35–40 см больше толщины наружных и не менее чем на 70 см больше толщины внутренних стен и перегородок. При возведении стен выступающие из-под них части полос необходимо защитить от загрязнения и повреждения.

На втором этапе после возведения стен (рис. 5.16) мембрана устанавливается на оставшейся незащищенной площади между стенами непосредственно перед бетонированием плиты пола.

Покрытие — тонкий, малопроницаемый для радона слой состава, который наносится в жидком состоянии на твердую основу. Для устройства радонозащитных бесшовных покрытий используют жидкие, отверждающиеся на воздухе, гидроизоляционные и антикоррозионные материалы на основе полимерных и битумно-полимерных композиций.

Покрытия наносят на поверхность несущей конструкции посредством напыления или наливки. Они выполняют те же функции, что и мембраны, от которых отличаются составом изолирующего материала и способом его нанесения на несущую конструкцию. Покрытия рекомендуется использовать в случаях реконструкции или реставрации старых зданий, когда поверхность защищаемой конструкции имеет сложную форму и в сохраняемых конструкциях имеются многочисленные швы и стыки (рис. 5.17).

Покрытия из современных материалов долговечны, имеют короткое время реакции отверждения, высокие прочность и относительное удлинение, износостойки и способны противостоять воздействию агрессивных веществ. Покрытия могут наноситься на внешнюю или внутреннюю поверхность ограждающей конструкции, а также между ее элементами.

Пропитка — жидкий состав, внедряемый в поры и пустоты материала несущего слоя. Пропитку проникающим составом обычно используют для уменьшения радонопроницаемости материала основной конструкции, например бетона, оштукатуренной кладки из кирпича и т. п.

Материал пропитки представляет собой суспензию или эмульсию, составленную на цементной, битумной, латексной или полимерной основе, способную глубоко внедряться в поры и микротрещины обрабатываемого материала. Некоторые пропитки образуют на поверхности материала сплошную пленку.

Нанесение пропиточного состава обычно производится посредством механического распыления. Пропитки рекомендуется использовать также для снижения радонопроницаемости утрамбованного пласта мелко-дисперсного материала (глины, песка), устраиваемого в неэксплуатируемых подпольях зданий с небольшим заглублением подземной части. Радонозащитный эффект

пропитки может быть повышен за счет послойного формирования пласта с последовательной обработкой каждого слоя.

Уплотнение — герметизации щелей и стыков в конструкции с использованием упругих или пластичных нетвердеющих материалов (герметиков). Защитный эффект практически непроницаемых для радона подземных ограждающих конструкций может быть сведен к нулю при наличии неуплотненных (незагерметизированных) щелей в стыках конструкций или в узлах прохода инженерных коммуникаций через конструкции. Уплотнение должно выполняться с учетом возможного раскрытия щели в стыке в процессе эксплуатации здания вследствие вибрации, осадки здания и т. п. Уплотняющий материал должен компенсировать эти изменения без потери защитных свойств.

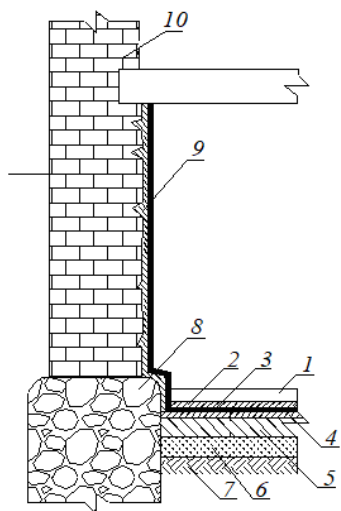


Рисунок 5.17 — Покрытие, наносимое на внутренние поверхности ограждающих конструкций:

1 — чистый пол; 2 — защитная стяжка; 3 — покрытие; 4 — выравнивающий слой; 5 — бетон; 6 — песчаная подсыпка; 7 — грунт; 8 — фундамент (бутовая кладка); 9 — выравнивающий слой штукатурки; 10 — кирпичная кладка

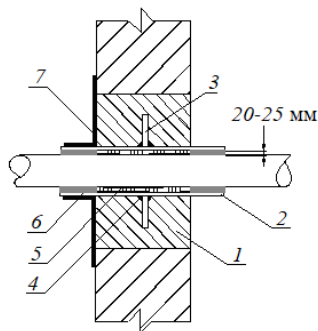


Рисунок 5.18 — Уплотнение узла прохода труб тепло-водоснабжения в здание: 1 — заполнение проема бетоном; 2 — стальная гильза; 3 — шайба; 4 — сварной шов; 5 — центровка трубы в гильзе с помощью набивки из просмоленной пакли; 6 — заполнение нетвердеющим герметиком на глубину 50 мм; 7 — гидроизоляция

Подземные каналы для прокладки наружных сетей тепло- и водоснабжения могут оказаться своего рода коллекторами радона, поэтому проемы для прохода труб из каналов в здание должны быть надежно уплотнены (рис. 5.18).

Целесообразно стремиться к тому, чтобы количество таких проемов в подземных ограждающих конструкциях было минимальным. При уплотнении узлов пересечения конструкций трубами следует учитывать неизбежность их подвижки вследствие температурных деформаций. Узлы пересечения должны быть доступны для контроля и ремонта в процессе эксплуатации.

5.4.2. Активные технологии защиты зданий от радона

Вентиляция — замещение в заданном пространстве воздуха с высоким содержанием радона наружным воздухом. Приточно-вытяжная вентиляция помещений позволяет существенно снизить активность радона во внутреннем воздухе. Однако эта возможность ограничена допустимой санитарными нормами и экономически оправданной величиной кратности воздухообмена.

С точки зрения противорадоновой защиты важно, чтобы система вентиляции не создавала в помещении более низкого давления, чем в подполье. Избыточное давление в помещении могло бы полностью предотвратить конвективное проникновение в него радона из подпольного пространства. Однако при этом существенно ухудшается влажностный режим ограждающих конструкций. Оптимальным вариантом является хорошо сбалансированная вентиляция, обеспечивающая выполнение требований санитарных норм при минимальном понижении давления в помещении.

В бесподвальных зданиях с неэксплуатируемым вентилируемым подпольем активность радона в помещениях практически не превышает его активности в наружном воздухе. Требуемый для этого воздухообмен в подполье обеспечивается при его сквозном проветривании, расположении нижней отметки перекрытия подполья на высоте не менее 1 м от уровня земли, суммарной площади вентиляционных проемов в цоколе, устраиваемых со всех сторон здания, составляющей от 1 до 2 % площади здания.

Депрессия подпольного пространства — создание зоны пониженного давления (депрессии) на пути движения радона из грунта в здание. Разность объемных активностей радона в основании здания и внутри него может достигать нескольких сотен тысяч Бк/м³.

Радоновая нагрузка на граничащую с грунтом горизонтальную конструкцию существенно снижается в случае создания под ней зоны депрессии и отвода радона из этой зоны в атмосферу. Метод депрессии наиболее часто используется в США, где разработан стандарт на его применение, в основном он используется при строительстве малоэтажных жилых домов, школ и других зданий с длительным пребыванием людей. Создание депрессии под фрагментированным или сплошным радонозащитным барьером является одним из наиболее эффективных способов противорадоновой защиты при высоком радоновом потенциале грунта.

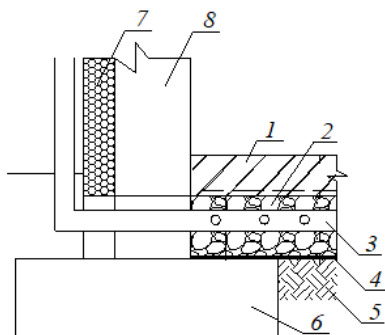


Рисунок 5.19 — Пассивная система создания депрессии в подпольном пространстве: 1 — бетонная плита; 2 — щебень; 3 — вытяжная труба; 4 — фильтрующий слой; 5 — уплотненный грунт; точечный фундамент; цокольная панель;

Для создания зоны депрессии под барьером размещают слой инертного газопроницаемого материала, которым чаще всего служит промытый гравий или щебень с толщиной не менее 15 см и размерами зерен 8–12 см (рис. 5.19). При этом доля сообщающихся пустот в слое должна составлять не менее 40 %. Во избежание заиливания гравийного слоя при движении грунтовых вод в процессе эксплуатации под ним размещают слой фильтрующего материала — десятисантиметровый слой крупнозернистого песка или геомембрану.

Если бетонирование плиты пола производится по гравийному слою, то для исключения затекания в него бетонной смеси поверх гравия размещают сплошной слой полиэтиленовой пленки толщиной не менее 0,2 мм.

Отвод радона из гравийного слоя в окружающее пространство (рис. 5.20) осуществляется по подземным и надземным пластмассовым трубам диаметром не менее 10 см. Подземные трубы устанавливаются в гравийном слое и предназначены для сбора почвенного газа. Надземные (стояки и горизонтальные прогоны) служат для отвода газа из подземных труб в атмосферу. Свободные концы труб

в подземной части должны быть заглушены, а сами трубы перфорированы. Чтобы внутренние фундаменты не препятствовали перемещению радона в гравийном слое, в них должны быть предусмотрены проемы. В зависимости от площади здания подземные трубы располагают по осям защищаемых площадей или на расстоянии 0,5–0,7 м параллельно лентам фундамента.

Отвод газа и понижение давления в гравийном слое обеспечиваются за счет естественной тяги или принудительной вытяжной вентиляции. Стояки могут быть расположены вне дома или внутри него. Внутреннее расположение стояков предпочтительнее, так как при этом обеспечивается более высокая естественная тяга. При естественной вытяжке одной подземной трубы достаточно для обслуживания 40–50 м² защищаемой площади. При использовании принудительной вытяжки эффективная работа системы обеспечивается при установке одной подземной трубы из расчета на 100–120 м² защищаемой площади.

Все стыки и соединения надземных труб должны быть надежно уплотнены и доступны для осмотра и обслуживания. При внутренней разводке труб целесообразно размещать их в подсобных помещениях или в углублениях во внутренних стенах.

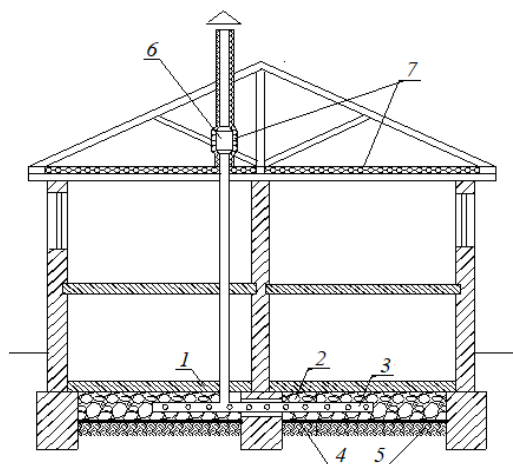


Рисунок 5.20 — Активная система создания депрессии в подпольном пространстве: 1 — бетонная плита; 2 — щебень; 3 — перфорированная труба; 4 — фильтрующий слой; 5 — уплотненный грунт; 6 — вытяжной вентилятор; 7 — теплоизоляция

Почвенный газ содержит водяной пар, который в холодный период года может конденсироваться в трубах. Для уменьшения количества образующегося конденсата и предотвращения образования наледи наружные трубы и трубы, проходящие через неотапливаемые помещения, необходимо теплоизолировать.

Разводку надземных труб следует производить так, чтобы по ним обеспечивался беспрепятственный сток конденсата в грунт и не создавались водяные пробки в понижениях и изгибах. Для снижения потерь статического давления в вытяжных трубах рекомендуется использовать в них как можно меньше изгибов и горизонтальных прогонов. Для фиксации труб используются крепежные элементы, устанавливаемые на ограждающих конструкциях дома не реже чем через 1,8 м для горизонтальных прогонов и 2,4 м для стояков.

Для предотвращения повторного поступления отводимого радона в здание рекомендуется:

- выпуск стояка располагать как можно ближе к коньку крыши;
- конец стояка (точку выброса газа) располагать не менее чем на 0,5 м выше конька крыши и не менее чем на 3 м выше уровня земли;
- располагать конец стояка на расстоянии более 3 м от печной трубы, ближайшего окна или вентиляционного проема (в том числе соседнего здания).

Для эффективной работы системы естественной вытяжки необходимо, чтобы разность давлений в гравийном слое и в верхнем конце стояка составляла не менее 5 Па. При устройстве принудительной вытяжки оптимальный диаметр надземных труб зависит от схемы их прокладки и производительности вентилятора. Хорошие результаты достигаются при использовании пластмассовых труб диаметром 100–150 мм и шумозащищенных осевых канальных вентиляторов производительностью 150–250 м³/ч, например марки TD Silent. Корпус вентилятора следует размещать в чердачном помещении или на техническом этаже, как можно ближе к точке выброса газа. Места соединения корпуса вентилятора с трубами должны быть герметичны, установка вентиляторов в подвале и на жилых этажах здания, не допускается.

Во избежание накопления конденсата в корпусе вентилятора рекомендуется устанавливать его в вертикальном прогоне трубопровода.

Для облегчения обслуживания и замены вентилятора целесообразно использовать съемный крепеж и гибкие соединения вентилятора с трубой, что одновременно уменьшает передачу вибрации и шума.

При подключении вентилятора к электросети рекомендуется устанавливать два выключателя: один в удобном для пользователя месте, а второй — рядом с вентилятором для исключения возможности его включения при производстве ремонтных или профилактических работ. Для управления работой и контроля состояния и эффективности работы вытяжной системы используют приборы ее автоматического включения, датчики давления, устройства сигнализации и т. п.

Все элементы систем должны удовлетворять требованиям норм пожаро- и электробезопасности, а также должны быть помечены понятным для пользователя образом для того, чтобы не путать их с элементами других инженерных систем дома, таких как система вентиляции помещений.

Дезактивация внутреннего воздуха — снижение концентрации дочерних продуктов радона, содержащихся во внутреннем воздухе. Дочерние продукты радона под действием электростатических сил осаждаются на взвешенных в воздухе частицах пыли, дыма, пыльцы растений, спор и т. п. Поэтому при удалении этих загрязнений из воздуха одновременно удаляются дочерние продукты радона. Для дезактивации воздуха пригодны любые способы и устройства его тонкой очистки. Дезактивацию воздуха рекомендуется осуществлять при повышенных требованиях к качеству внутренней среды в помещениях, а также в случаях, когда исчерпаны иные возможности нормализации радоновой обстановки в здании.

Реконструкция грунтового основания — замещение в основании здания интенсивно выделяющего радон грунта малоактивным плотным грунтом. Реконструкция грунтового основания здания требует значительных затрат и поэтому исключительно с целью его противорадоновой защиты, как правило, не производится. Реконструкция целесообразна только в том случае, когда она может быть вызвана иной веской причиной. Например, необходимостью удаления газогенерирующих или опасно загрязненных химическими веществами грунтов. В таких случаях по соображениям радонобезопасности в качестве замещающего рекомендуется использовать грунт с удельной активностью радия-226 не более 15 Бк/кг.

Радопроницаемость замещающего грунта может быть понижена посредством его пропитки уплотняющим составом на основе цементного, битумного или латексного связующего, уплотнения и нанесения на выровненную поверхность битумной эмульсии или цементной суспензии.

Однако следует иметь в виду, что пассивные и активные технологии защиты от радона не являются равноценными. Вне зон радиационных аномалий радоновая безопасность зданий должна в полной мере обеспечиваться его подземными ограждающими конструкциями, выполняющими несущие функции. Необходимость использования систем вентиляции для нормализации радоновой обстановки говорит о просчетах в проектировании основания здания. Активные радонозащитные технологии обязательны в зданиях на грунтах, богатых радоном и высокопроницаемых грунтах, а также для строений в пределах разломных структур и зон активной микрогеодинамики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований, направленных на решение проблемы создания научных основ обеспечения радоновой безопасности зданий средствами строительного производства. Проведенные исследования позволяют оценить влияние геофизических, климатических и конструктивных факторов на формирование радоновой обстановки в здании.

По результатам проведенных исследований можно сформулировать следующие выводы и практические рекомендации:

1. Население Российской Федерации большую часть индивидуальной годовой дозы облучения получает в зданиях от радона и его дочерних продуктов распада. В подавляющем большинстве случаев грунтовое основание здания является основным источником поступления радона в помещения нижнего этажа.

2. Облучение радоном в зданиях является управляемой компонентой радиационной нагрузки на население, величина которой может быть существенно снижена посредством использования технологий и средств строительства, суть которых заключается в проектировании и строительстве подземных ограждающих конструкций, эффективно препятствующих поступлению радона в здание.

3. Диффузия является основным механизмом поступления радона в здания, построенные по современным технологиям. Диффузионный перенос не имеет определенных маршрутов и требует использования в конструкции пола материалов с малой длиной диффузии радона в них.

5. Вне зон радиационных аномалий рациональное проектирование подземных ограждающих конструкций позволяет ограничить поток радона через горизонтальные подземные ограждающие конструкции величиной, при которой контрольный уровень в 100 Бк/м^3 будет обеспечен с достаточным запасом.

6. В настоящее время вопрос необходимости реализации и содержания мер по противорадоновой защите строящихся зданий решается на основе оценки плотности потока радона из грунта на участке застройки, которая не дает информации, необходимой для проектирования адекватных условиям строительства мероприятий по противорадоновой защите зданий.

7. Необходимо принципиально изменить подход к методам и средствам обеспечения радоноопасности зданий, отказавшись от использования величины ППР как критерия радоноопасности участка застройки. На данный момент методы проектного расчета поступления радона из грунта в здание отсутствуют, а критерии оценки радонозащитных свойств конструкций не установлены, поэтому их определение является наиболее актуальной научно-практической задачей.

8. Опыт разработки строительных норм и правил в НИИ строительной физики РААСН показывает, что здание необходимо рассматривать как единую систему, включающую все факторы, оказывающие значимое влияние на формирование радоновой обстановки в нем. В данном случае, формирование радоновой обстановки в здании необходимо рассматривать в рамках единой системы сред «грунт-атмосфера-здание».

9. Многофакторный характер процесса формирования радоновой обстановки в зданиях существенно ограничивает возможности его продуктивного натурного исследования. Множество воздействующих на процесс факторов, разнонаправленность их действия и отсутствие возможности инструментального контроля отдельных из них часто не позволяют правильно интерпретировать полученные результаты.

10. Математическое моделирование многофакторного процесса свободно от недостатков натурного исследования, оно дает возможность управлять действием каждого из факторов формирования радоновой обстановки в здании и требует значительно меньше времени на проведение исследования.

11. Современный уровень понимания закономерностей переноса радона в пористых средах не позволяет построить универсальную математическую модель, более целесообразна разработка модели, адекватно описывающей поступление радона в здания и сооружения с определенной конструкцией пола при любых внешних условиях.

12. Модельные исследования, проведенные в предположении диффузионного поступления радона в здание, показали, что величина сопротивления радонопроницанию в полной мере характеризует радонозащитную способность конструкции и может служить критерием для сравнительной оценки эффективности различных технических решений многослойных ограждающих конструкций или их отдельных элементов.

Результаты исследований легли в основу разработанного автором свода правил СП 321.1325800.2017 «Здания жилые и общественные. Правила проектирования противорадоновой защиты».

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

А. Радиационно-физические определения/Radiation and physical definitions

<p>Активность <i>A</i>, Бк — среднее число самопроизвольных распадов радиоактивного вещества в единицу времени в 1 м³ вещества</p>	<p>Activity <i>A</i> (Bq) is the mean number of spontaneous decays of radioactive material per the time unit in 1 m³ matter volume</p>
<p>Актинон <i>An</i> — естественный изотоп радона ²¹⁹Rn с периодом полураспада $T_{1/2} = 3,96$ с, образующийся в семействе урана-235</p>	<p>Actinon <i>An</i> is the naturally occurring radioactive gas with half-life of 3.96 s, which is formed in the ²³⁵U decay chain</p>
<p>Геодинамическая зона — пространственно ограниченный массив горных пород, в котором, вследствие текущих природных геодинамических процессов, происходит цикличное изменение поля напряжения (давления), обуславливающее перемещение радона на расстояния, превышающее длину диффузионного переноса</p>	<p>Geodynamic zone is a spatially limited rocks array with a cyclic change of the pressure field due to the current natural geodynamic processes. These changes cause the radon transfer more than the diffusion transfer length</p>
<p>Диффузия — процесс массопереноса, обусловленный движением молекул вещества из области с большей концентрацией в область с меньшей концентрацией</p>	<p>Diffusion is the process in which molecules move from a region of higher concentration to one of lower concentration</p>
<p>Длина диффузии радона <i>L</i>, м — расстояние, на котором активность радона проходящего через слой материала вследствие диффузии, уменьшается в результате распада в <i>e</i> раз ($e \approx 2,72$)</p>	<p>Diffusion length of radon <i>L</i> (m) is the mean distance travelled by radon atoms in the residue matrix before their radioactive decay</p>
<p>Дочерние продукты распада радона ²¹⁸Po, ²¹⁴Po, ²¹⁴Pb и ²¹⁴Bi — семейство короткоживущих, α- и γ-излучающих продуктов распада радона, формирующих большую часть дозы внутреннего облучения</p>	<p>Progeny ²¹⁸Po, ²¹⁴Po, ²¹⁴Pb and ²¹⁴Bi are the short half-life alpha- and gamma-emitting isotopes, which delivers a radiologically significant dose to the respiratory epithelium</p>
<p>Закон Фика — плотность потока радона прямо пропорциональна градиенту его объемной активности</p>	<p>Fick's law — the radon flux density is linearly proportional to its concentration gradient</p>

Конвекция — процесс переноса радона под действием внешних факторов (разности температур или давлений, массовых сил и т. д.)	Advection is the process of radon transfer under the external factors action, such as the temperature or pressure differences, mass forces, etc
Кратность воздухообмена n , ч ⁻¹ — отношение объема воздуха заменяемого в помещении в течение единицы времени к объему помещения	Air change rate n , (h ⁻¹) is the number of total air changes in the room per time unit
Коэффициент извилистости β — отношение истинной длины поры к ее проекции на направление переноса	Tortuosity factor β is the ratio of the length of the pore to the distance between the ends of it
Коэффициент молекулярной диффузии радона D , м ² /с — количество радона, проходящего в единицу времени через единицу поверхности при единичном градиенте концентрации	Molecular diffusion coefficient of radon D is the radon rate passing per time unit through a unit of surface at a single concentration gradient. Unit of measurement is the square meter per second, м ² ·с ⁻¹
Коэффициент радонопроницаемости K , м/с — плотность потока радона через конструкцию из одного или нескольких слоев материалов при разности объемных активностей радона на внешних границах в 1 Бк/м ³	Radon transmittance coefficient K (м·с ⁻¹) is the radon flux density through the construction from one or more material layers at the 1 Bq·м ⁻³ radon concentration difference on external borders of construction
Коэффициент эманирования $k_{эм}$ — отношение количества попадающих в поровое пространство материала и способных к миграции внутри этого пространства (свободных) атомов радона, к общему количеству атомов радона образующихся в твердой фазе	Emanation coefficient k_{em} is the fraction of radon atoms generated that escape the solid phase in which they are formed and become free to migrate through the porous medium
Коэффициент сдвига радиоактивного равновесия — отношение эквивалентной равновесной объемной активности радона к его объемной активности. При $F = 1$ радон находится в равновесии с дочерними продуктами распада	Equilibrium factor (F-factor) is used to describe the ratio between radon and its progeny. An F -factor of 1 means equal amounts of radon and its progeny
Критерий — количественный показатель (мерило), позволяющий оценивать что либо, на соответствие предъявленным требованиям (мере)	Criterion is the quantitative indicator (measure), which allows to evaluate something to meet the requirements
Мощность активного слоя грунта — минимальная толщина слоя грунта, при которой выделения радона на верхней поверхности слоя обусловлены в основном действием источников радона внутри слоя	The power of the active soil layer is the minimum soil layer thickness when the radon emissions on the upper border of soil layer are mainly due to the action of radon sources within the layer

Наружный уровень радона — объемная активность радона в атмосферном воздухе, которая обычно не превышает 10 Бк/м^3	Outdoor ambient radon level is the amount of radon naturally occurring in outdoor air at a locality
Национальный контрольный уровень — объемная активность радона в воздухе помещения, при которой рекомендуются мероприятия по ее снижению	National control level is the indoor radon concentration at which mitigation is recommended
Параметр Кнудсена — отношение числа столкновений молекул со стенками к числу межмолекулярных столкновений, определяет характер движения газов в пористой среде	Knudsen's number is the ratio of a molecules collisions number of with the walls of an intermolecular collisions number. It determines the gas movement character through a porous media
Перенос радона — диффузионное и/или конвективное перемещение атомов радона сквозь грунт к поверхности земли или к подземным ограждающим конструкциям	Radon transport is diffusion or/and advective flow cause the movement of the radon atoms through the soil profile to the ground surface or to the underground walling
Период полураспада $T_{1/2}$, с — время, за которое распадается половина атомов данного радиоактивного вещества	Half-life $T_{1/2}$ (s^{-1}) is the time taken for the activity of a given amount of a radioactive substance to decay to half of its initial value
Пористость — безразмерная характеристика пористой среды, равная относительной объемной доле порового пространства в материале	Porosity is the dimensionless porous medium characteristic, the relative volume fraction of the pore space in the material
Порода-коллектор — горная порода, в которой, вследствие наличия трещин, каверн, карстовых пустот и т. п., действует сложный механизм газопереноса и радон перемещается на расстояние, превышающее длину диффузионного переноса	Reservoir rock is a rock with the presence of cracks, caverns and karst voids. The complex gas transport mechanism operates in a reservoir rock and the radon moves a distance greater the diffusion transfer length
Постоянная радиоактивного распада λ, с^{-1} — это вероятность распада каждого отдельного ядра атома за единицу времени. Для радона $\lambda_{\text{Rn}} = 2,098 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$	Decay constant λ (s^{-1}) is the proportionality coefficient between the number of radioactive atoms and the rate at which this number decreases during the radioactive decay. The radon decay constant is $2,098 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$
Почвенный газ — смесь газов, заполняющих поры и пустоты в грунте	Soil gas is a mixture of gases filling the pores and voids in the ground
Проницаемость — свойство пористой среды пропускать жидкость, газ или газожидкостную смесь при наличии перепада давления	Permeability is the porous medium ability to transport a fluid through it by the advection process

Противорадоновая защита — техническое мероприятие, предпринятое с целью снижения содержания радона и его дочерних продуктов в воздухе помещения	Protection against radon is a technical measure taken to reduce the radon and its progeny concentration in the indoor air
Равновесие радиоактивное — состояние статистического равновесия между количествами радиоактивных веществ, образующихся одно из другого	Radioactive equilibrium is a statistical equilibrium state of between the parent radionuclide and its progeny
Радон Rn — радиоактивный благородный газ без цвета, вкуса и запаха, все его изотопы радиоактивны и имеют массовые числа от 200 до 226	Radon (Rn) is a colorless, odorless, tasteless, radioactive noble gas. All radon's isotopes are radioactive and include mass numbers ranging from 200–226
Радон-222 — главный изотоп радона, который образуется в ряду распада ^{238}U и имеет достаточно большой период полураспада в 3,82 дня	Radon-222 is the most common isotope of radon with relatively long half-life of 3.82 days, which is formed in the ^{238}U decay chain
Радонобезопасность — состояние объекта, при котором с установленной вероятностью исключается возможность нанесения ущерба здоровью человека вследствие избыточного воздействия радона на его организм	Radon safety is the object state in which the possibility of causing damage to human health due to the excessive effect of radon on its organism is excluded with an established probability
Радоновая экспозиция — количество времени, которое человек проводит при данной концентрации радона	Radon exposure is the amount of time a person spends in any given radon concentration
Радоновый потенциал грунта П , Бк/м ³ — величина объемной активности свободного радона в единице объема грунтового массива, при нулевом значении градиентов активности на границах объема	The soil radon potential G (Bq·m ⁻³) is the concentration of free radon per volume unit of the soil mass if with zero activity gradients at the volume boundaries
Радонопасная территория — национальный контрольный уровень превышен в значительном проценте зданий территории	Radon-prone area — an area where a significant proportion of homes exceed the reference level
Торон ^{220}Rn — продукт превращений семейства тория, имеющий период полураспада $T_{1/2} = 54,5$ с	Thoron gas ^{220}Rn is the second common isotope of radon with half-life of 54.5 s, which is formed in thorium decay chain
Сопротивление радонопроницанию R , с/м — разность объемных активностей радона на внешних границах конструкции (Бк/м ³), при которой через нее проникает поток радона плотностью 1 Бк/(м ² ·с).	Radon resistance R (s·m ⁻¹) is the difference of radon concentration (Bq·m ⁻³) on the construction external borders at radon flux density through this construction of 1 Bq·m ⁻² ·s ⁻¹ .

Эквивалентная равновесная объемная активность (ЭРОА) радона — сумма объемных активностей неравновесной смеси ДПР в воздухе, создающая такую же эффективную дозу внутреннего облучения, что и смесь ДПР, находящихся в радиоактивном равновесии с радоном.	Equivalent equilibrium radon concentration (EERC) is the concentrations sum of a nonequilibrium progeny mixture in air, which creates the equal effective dose of internal irradiation as the progeny mixture in radioactive equilibrium with radon.
Экхалляция — выделение радона с поверхности грунта в атмосферу	Exhalation is the radon atoms transfer from the soil surface to the atmosphere
Эманирование — выделение атомов радона, образовавшихся при распаде радия, из зерен в поровое пространство.	Emanation is the escape of radon atoms formed at the radium decay from the grains into the interstitial space between the grains.

Б. Строительные термины/Building definitions

Активное разрежение почвы — это система ограничения поступления радона за счет создания вентилятором зоны пониженного давления в грунте под плитой или мембраной	Active soil depressurization is a radon control system involving fan-powered soil depressurization including but not limited to sub-slab depressurization and sub-membrane depressurization
Депрессия (разрежение) — создание в некотором объеме пространства пониженного давления.	Depressurezation is the creation of underpressure in a specific volume.
Жилище — любое здание, которое содержит одну или несколько жилых комнат	Dwelling is any building that contains one or two units that are intended to be occupied for living purposes
Замедлитель грунтового газа — сплошная мембрана или другой похожий материал, уложенный на камеру сбора почвенного газа или поверх земляного пола с целью снижения потока газа из грунта в здание	Soil gas retarder is a continuous membrane or other comparable material laid over a soil gas collection plenum or earthen floor area that is used to retard the flow of soil gases into a building
Камера сбора почвенного газа — встроенная камера для сбора радона и других почвенных газов из-под фундамента	Soil gas collection plenum is a constructed enclosure for collecting radon and other soil gases from under a foundation
Коллектор почвенного газа — газопроводимый трубопровод, состоящий из перфорированной трубы или геотекстильного покрытия в слое гравия, предназначенный для сбора радона и других почвенных газов внутри камеры сбора почвенного газа и соединения камеры с трубами системы активного разрежения почвы	Soil gas collector is a gas permeable conduit constructed of gravel, perforated pipe or geotextile matting for collecting radon and other soil gases from within a soil gas collection plenum and connecting the plenum the ASD pipe system

Кольцевая труба — длинная непрерывная перфорированная труба, проходящая по внутреннему периметру фундамента	Pipe loop is a continuous length of perforated pipe extending around the inside perimeter of the foundation
Комбинированный фундамент — конструкция с более чем одним типом фундамента, например, подвал и земляной пол или подпол и плита на грунте	Combination foundation is a construction with more than one foundation type, such as basement and crawlspace or basement and slab-on-grade
Мембраны (барьеры) — сплошной листовый полимер, размещаемый при строительстве по фундаменту дома с целью предотвращения поступления радона из грунта в здание	Membranes (barriers) are the continuous plastic type sheet that is placed across the foundation of the house during construction, whose purpose is to prevent radon entering the house when construction is completed
Площадь депрессии — пространство под плитой основания, в котором создается область пониженного давления в грунте	Depressure area is the sub-slab area with a low pressure
Подмембранная разгерметизация — метод уменьшения поступления радона, основанный на поддержании более низкого давления воздуха в пространстве под мембраной замедлителя грунтового газа при помощи вентилятора системы активного разрежения почвы, отбирающего воздух из-под мембраны	Sub-membrane depressurization is a radon mitigation technique designed to maintain lower air pressure in the space under a soil gas retarder membrane than above it by use of an ASD fan drawing air from beneath membrane
Подпол — тип фундамента с открытой областью под жилым пространством жилища, которое обычно образовано бетонной плитой или земляным полом. Подпол может иметь высоту от 10 см до 1 м, проветриваться наружным воздухом или быть герметичным	Crawlspace is a foundation type with an open area beneath livable space of a dwelling that typically has either a concrete slab or earthen floor. The crawlspace can have an open height of a few inches to several feet. The crawlspace may or may not be ventilated to the outdoors
Радиационно-геологические изыскания — инженерные изыскания, проводимые с целью определения радиационных характеристик грунтов в основании здания.	Radiation and geological surveys are the engineering surveys conducted to determine the radiation characteristics of soils at the building base.
Разгерметизация плиты основания — метод уменьшения поступления радона, основанный на поддержании более низкого давления воздуха под плитой основания, чем над ней, с помощью вентилятора, отбирающего воздух из-под плиты основания	Sub-slab depressurization is a radon mitigation technique designed to maintain lower air pressure in a floor slab than above it by use of an ASD fan installed in the radon system piping that draws air from below the floor slab
Система контроля радона предназначена для снижения уровней радона в воздухе помещений	Radon control system is a system designed to reduce radon concentrations in indoor air

Таунхаус — жилище для одной семьи, построенное в виде группы из трех или более сообщающихся объемов, каждый из которых ограничивается фундаментом, крышей и наружной территорией как минимум с двух сторон

Townhouse is a single family dwelling unit constructed in a group of three or more attached units where each unit extends from the foundation to the roof and has a yard or public way on at least two sides

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андреев, А. И. Определение среднегодовой объемной активности радона на рабочих местах / А. И. Андреев, П. М. Пупатенко // Безопасность в техносфере, 2014. — № 1. — С. 58–62.
2. Андреев, А. И. Радон в воздухе учебных заведений города Хабаровска и обусловленные им эффективные дозы / А. И. Андреев, И. М. Тесленко, П. М. Пупатенко // Вестник ТОГУ, 2015. — № 3(38). — С. 59–68.
3. Андреев, А. И. Радон как индикатор сейсмогеодинамической активности / А. И. Андреев, А. А. Коковкин, М. Б. Медведева // Безопасность в техносфере, 2011. — № 5. — С. 8–14.
4. Афонин, А. А. Оптимизация параметров блоков измерения для мониторинга радона, торона и их дочерних продуктов в различных средах // АНРИ, 2008. — № 3 (54). — С. 2–7.
5. Афонин, А. А. Установка для изучения характеристик переноса ^{218}Po в воздухе / А. А. Афонин, А. А. Котляров, А. Ю. Максимов // Приборы и техника эксперимента, 2010. — № 1. — С. 139–143
6. Бакаева, Н. В. Оценка вклада излучения строительных материалов в величину годовой дозы облучения / Н. В. Бакаева, А. В. Калайдо // Сборник статей VIII-й международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы экологии и охраны труда» — Курск: Изд-во ЮЗГУ, 2016. — Т. 1. — С. 75–79.
7. Бакаева, Н. В. Радиационные аспекты экологической безопасности городской застройки / Н. В. Бакаева, А. В. Калайдо // Материалы 4-й международной научно-практической конференции «Проблемы инновационного биосферно-совместимого социально-экономического развития в строительном, жилищно-коммунальном и дорожном комплексах», посвященной 55-летию строительного факультета и 85-летию БГИТУ — Брянск: Изд-во БГИТУ, 2015. — Т. 2. С. 10–16.
8. Бекман, И. Н. Радон: враг, врач и помощник. Конспект лекций. <http://profbeckman.narod.ru/rad.htm>.
9. Бекман, И. Н. Радиоактивность, радионуклиды и радиация. Учебное пособие. М.: Palmarium academic publishing, 2013. — 485 с.
10. Бобоев, Б. Д. Концентрация радона в воздухе некоторых жилых и рабочих помещений гг. Чкаловска и Кайраккума / Б. Д. Бобоев,

Н. Хакимов, Х. М. Назаров, К. А. Эрматов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан, 2013. — Т. 56. — № 8. — С. 639–642.

11. Боев, В. М. Содержание радона в почве и воздушной среде сели-тебных зон г. Оренбурга / В. М. Боев, Воробьев А. П., Дунаев В. Н. // Вестник ОГУ, 2005. — № 5. — С. 65–67.

12. Васильев, А. В. Исследование механизмов и источников поступления радона в здания, построенные по современным технологиям / А. В. Васильев, М. В. Жуковский, А. Д. Онищенко, А. А. Вишневский // Стройкомплекс Среднего Урала, 2012. — № 12. — С. 21–24.

13. Васильев, А. В. Результаты радонового обследования населенных пунктов, пострадавших в результате сброса радиоактивных отходов в реку Теча / А. В. Васильев, Г. П. Малиновский, А. Д. Онищенко, И. В. Ярмошенко // Гигиена и санитария, 2017. — Т. 96. — № 5. — С. 418–421.

14. Васильев, А. В. Строительные материалы как источник радона в зданиях, построенных по современным технологиям / А. В. Васильев, М. В. Жуковский, А. Д. Онищенко, А. А. Вишневский // Строительные материалы, 2013. — № 4. — С. 104–109.

15. Влацкий, Ф. Д. Исследования содержания радона в жилых помещениях Первомайского района Оренбургской области // Вестник ОГУ. Естественные и технические науки. Т. 2. — Оренбург: ОГУ, 2005. — С. 68–73.

16. Голованев, С. М. Радон и канцерогенный риск в Москве // Радиационная гигиена, 2015 — Т. 8. — № 1. — С. 16–22.

17. Гулябянц, Л. А. Мощность «активного» слоя грунта при диффузионном переносе радона в грунтовом основании здания / Л. А. Гулябянц, Б. Ю. Заболотский // АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений, 2001. — № 4. — С. 38–40.

18. Гулябянц, Л. А. Новый подход к решению проблемы защиты зданий от радона // Вестник МГСУ, 2011. — № 3. — С. 3–8.

19. Гулябянц, Л. А. Определение коэффициента диффузии радона в бетоне и изоляционных материалах / Л. А. Гулябянц, А. А. Цапалов // АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений, 2008. — № 2. — С. 44–48.

20. Гулябянц, Л. А. Определение требуемой радонозащитной способности подземных ограждающих конструкций зданий // Жилищное строительство, 2009. — № 7. — С. 34–38.

21. Гулябянц, Л. А. Плотность потока радона как критерий оценки радоноопасности / Л. А. Гулябянц, Б. Ю. Заболотский // АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений, 2004. — № 3. — С. 16–20.

22. Гулябянц, Л. А. Принцип построения новых норм проектирования противорадоновой защиты зданий // Благоприятная среда жизнедеятельности человека. Строительные науки, 2009. — № 5. — С. 461–467.

23. Гулябянц, Л. А. Радонозащитные свойства гидроизоляционного материала на основе бентонита / Л. А. Гулябянц, А. А. Цапалов // Строительные материалы, 2009. — № 2. — С. 67–69.
24. Гулябянц, Л. А. Радонопроницаемость рулонного материала. Техноэласт / Л. А. Гулябянц, А. А. Цапалов // Строительные материалы, 2008. — № 10. — С. 69–71.
25. Гулябянц, Л. А. Радонопроницаемость тяжелого бетона / Л. А. Гулябянц, А. А. Цапалов // Жилищное строительство, 2011. — № 1. — С. 39–41.
26. Гулябянц, Л. А. Расчет концентрации радона в помещениях проектируемых зданий / Л. А. Гулябянц, М. И. Лившиц // АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений, 2007. — № 4. — С. 9–13.
27. Гулябянц, Л. А. Сезонная вариация потока радона из грунта и оценка радоноопасности площади застройки / Л. А. Гулябянц, Б. Ю. Заболотский // АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений, 2004. — № 4. — С. 46–50.
28. Давыдов, М. Г. Радиоэкология: учебник для вузов / М. Г. Давыдов, Е. А. Бураева, Л. В. Зорина. — Ростов н/Д : Феникс, 2013. — 635 с.
29. Диденко, П. И. Экологические аспекты воздействия радона на население // Техногенно-экологічна безпека та цивільний захист, 2014. — № 6. — С. 72–81.
30. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2012 году: информационный сборник. — СПб., 2013. — 67 с.
31. Жуковский, М. В. Радон: измерение, дозы, оценка риска : монография / М. В. Жуковский, И. В. Ярмошенко // Екатеринбург : УрО РАН, 1997. — 232 с.
32. Жуковский, М. В. Радоновая безопасность зданий / М. В. Жуковский, А. В. Кружалов, В. Б. Гурвич, И. В. Ярмошенко // Екатеринбург: УрО РАН, 2000. — 180 с.
33. Иванов, С. И. Обеспечение радиационной безопасности населения в жилой среде: успехи и проблемы / С. И. Иванов, Н. А. Аكوпова, В. И. Чередникова, В. В. Кучумов // Гигиена окружающей и производственной среды, 2006. — № 4 (7). — С. 36–40.
34. Источники и эффекты ионизирующего излучения: Отчет НКДАР ООН по действию атомной радиации 2000 года Генеральной Ассамблеи с научными приложениями. — Т. 2: Эффекты / Пер. с англ.; под ред. акад. РАМН Л. А. Ильина и проф. С. П. Ярмоненко. — М.: РАДЭ-КОН, 2002. — 352 с.
35. Ким Д. Б., Левит Д. И. Физика атомного ядра и элементарных частиц: учеб. пособие. — Братск: ФБГОУ ВПО «БРГУ», 2012. — 145 с.
36. Клинская, Е. О. Содержание радона в воздухе помещений Еврейской автономной области / Е. О. Клинская, Н. К. Христофорова // Радиационная гигиена, 2012. — Т. 5. — № 1. — С. 20–24.

37. Комов, И. Л., Фролов О. С., Диденко П. И. и др. Основные проблемы радоновой безопасности. — Киев: Логос, 2005. — 351 с.
38. Кононенко, Д. В. Анализ применимости существующих моделей расчета риска при облучении радоном для оценки эффективности радонозащитных мероприятий в детских образовательных учреждениях // Радиационная гигиена, 2014. — Т. 7 — № 4. — С. 92–103.
39. Кононенко, Д. В. Оценка радиационного риска для населения Санкт-Петербурга при облучении радоном // Радиационная гигиена, 2013. — Т. 6. — № 1. — С. 31–37.
40. Кормановская, Т. А. Дозы природного облучения населения Сибирского федерального округа // Вести МАНЭБ в Омской области, 2013. — № 3. — С. 13–16.
41. Крисюк, Э. М. Радиационный фон помещений. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 119 с.
42. Кургуз, С. А. Влияние физических свойств радона на его распределение внутри зданий и помещений // Радиоэкология XXI века: материалы междунар. науч.-практ. конф., Красноярск, 14–16 мая 2012. — Красноярск: СФУ, 2012. — С. 145–150.
43. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкостей и газов. Учебник для вузов. — 7-е изд., испр. — М.: Дрофа, 2003. — 846 с.
44. Макаренко, М. Оцінка радононебезпеки територій міста Жовті Води Дніпропетровської області і Києва / М. Макаренко, П. Діденко, І. Купенко // Геолог України, 2010. — № 4. — С. 98–103.
45. Маргулис У. Я. Радиационная безопасность. Принципы и средства ее обеспечения / У. Я. Маргулис, Ю. И. Брегадзе // М: Эдиториал УРСС, 2000. — 120 с.
46. Машкова, И. В. Исследование уровней накопления радона в жилых помещениях населенных пунктов Чебаркульского района Челябинской области / И. В. Машкова, Т. Г. Крупнова, А. М. Кострюкова, С. С. Юдаков, Н. В. Назаренко // Экология и научно-технический прогресс. Урбанистика, 2014. — № 1. — С. 137–143.
47. Микляев, П. С. Исследования коэффициента эманирования грунтов // АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений, 2007. — № 2. — С. 30–38.
48. Микляев, П. С. Механизмы формирования потока радона с поверхности почв и подходы к оценке радоноопасности селитебных территорий / П. С. Микляев, Т. Б. Петрова // АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений, 2007. — № 2. — С. 2–17.
49. Микляев, П. С. Опыт применения изотопного геохимического метода для исследования условий переноса радона к дневной поверхности / П. С. Микляев, Т. Б. Петрова, А. А. Цапалов // АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений, 2012. — № 1. — С. 15–20.

50. Микляев, П. С. Уровни эксхалиции радона на западном склоне горы Бештау, Кавказские Минеральные Воды // П. С. Микляев, Т. Б. Петрова, А. М. Маренный, Н. А. Нефедов, Т. В. Остапчук, Д. В. Щитов, П. А. Сидякин, М. А. Мурзабеков // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*, 2018. — № 5. — С. 20–30.

51. Мирончик, А. Ф. Естественные радиоактивные вещества в атмосфере и воздухе жилых помещений Республики Беларусь // *Вестник Белорусско-Российского университета*, 2007. — № 4 (17). — С. 162–171.

52. Ненахова, Е. В. Гигиеническая оценка опасности радона в жилых помещениях на территории Прибайкалья / Е. В. Ненахова, О. А. Макаров, Б. П. Черняго [и др.]. — *Бюллетень ВСНЦ СО РАМН*, 2006. — № 6 (52). — С. 191–193.

53. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): (Ионизирующее излучение, радиационная безопасность СП 2.6.1.2523–09): зарегистрирован 14 августа 2009 г. Регистрационный № 14534 — М.: Минюст России, 2009. — 225 с.

54. Обоснование комплексного применения некоторых косвенных показателей радона для картирования радонового потенциала / Л. А. Чунихин, А. Л. Чеховский, Д. Н. Дроздов // *Theoretical & Applied Science*, 2014. — № 6–4 (6). — С. 96–98.

55. ОСПОРБ-99/2010. Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612–10 Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 26 апреля 2010 г. № 40).

56. Пархоменко, В. И. К вопросу о радиационной безопасности городов и поселений на примере Брянской области / В. И. Пархоменко, Н. Ф. Пискунов // *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*, 2013. — № 3. — С. 66–72.

57. Польский, О. Г. Система обеспечения радиационной безопасности населения московского мегаполиса / О. Г. Польский, Ю. В. Варшавский, В. В. Вербов [и др.] // *Медицина труда и промышленная экология*, 2006. — № 2. — С. 4–11.

58. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности МАГАТЭ (пер. с англ.). — Вена, 2015. — 520 с.

59. Рекомендации 2007 года Международной комиссии по радиационной защите: Публикация 103 МКРЗ (пер. с англ.), 2009. — М.: Изд-во ООО ПКФ «Алана».

60. Рогалис, В. С. Вклад радона и среды обитания человека в формирование радиозоологической обстановки в г. Москве / В. С. Рогалис [и др.] // *Геофизический вестник*, 2008. — № 6. — С. 14–16.

61. Романович, И. К. Природные источники ионизирующего излучения: дозы облучения, радиационные риски, профилактические мероприятия /

ФБУН НИИРГ им. П. В. Рамзаева [Романович И. К., Стамат И. П., Кормановская Т. А., Кононенко Д. В. и др.]; под редакцией академика РАН Г. Г. Онищенко и профессора А. Ю. Поповой. — Санкт-Петербург: ФБУН НИИРГ им. П. В. Рамзаева, 2018.— 432 с.

62. Рузер, Л. С. Радиоактивные аэрозоли. М.: Энергоатомиздат, 2001. — 119 с.

63. Сафаров, Р. Х. Физика атомного ядра и элементарных частиц: учебное пособие для студентов педагогических вузов. — Казань: РИЦ «Школа», 2008. — 280 с.

64. Сидельникова, О. П. Естественные радионуклиды в строительных материалах и отходах промышленности Волгоградской области // Вестник ВолгГАСУ. Серия: Строительство и архитектура, 2016. — 44–2 (63). — С. 52–60.

65. Сидельникова, О. П. Радиационно-экологическая безопасность строительных материалов, производимых в Волгоградской области // Вестник ВолгГАСУ. Серия: Строительство и архитектура, 2016. — 44–2 (63). — С. 43–51.

66. Сидельникова, О. П. Эффективная удельная активность природных радионуклидов в строительных материалах Волгоградской области / О. П. Сидельникова, Ю. Д. Козлов // Интернет-Вестник ВолгГАСУ, 2013. — № 2 (27). — С. 34–38.

67. Сидякин, П. А. О радиационно-экологической обстановке в урбанизированных территориях городов-курортов Кавказских Минеральных Вод / П. А. Сидякин, Д. В. Щитов, Н. А. Фоменко, С. А. Лебедева // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2015. — № 1. — 10 с.

68. Сидякин, П. А. Формирование уровней облучения населения региона Кавказских Минеральных Вод за счёт радиоактивности горных пород / П. А. Сидякин, Э. Г. Янукян, Н. А. Фоменко, Н. В. Вахилевич // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка, 2016. — № 1. — С. 66–70.

69. Сормунен, П. Энергоэффективность зданий. Ситуация в Финляндии // Инженерно-строительный журнал, 2010. — № 1. — С. 7–8.

70. Термечикова, Р. Б. Результаты радоновых исследований в Иссык-Кульской области Киргизии / Р. Б. Термечикова, М. В. Жуковский // X Международный экологический симпозиум «Урал атомный, Урал промышленный 2002». Тезисы докладов. Екатеринбург, 2002. — С. 186–188.

71. Титов, В. К. Радиогеохимические методы контроля вредного воздействия радона на население / В. К. Титов, И. А. Лучин, Б. П. Лашков // Разведка и охрана недр, 1991. — № 11. — С. 22–27.

72. Тихонов, М. Н. Последствия облучения населения радоном // Экология промышленного производства, 2010. — № 1. — С. 22–31.

73. Тихонов, М. Н. Радоновая опасность: источники, дозы и нерешенные вопросы / М. Н. Тихонов. — М.: ВИНТИ, 2008. — Вып.3. — С. 29–51. — (Обзорная информация / Экол. Экспертиза).

74. Торосян, В. Ф. Исследование особенностей распределения радона в жилых и служебных помещениях / В. Ф. Торосян, А. А. Приезжев // Технологии техносферной безопасности, 2014. — № 3 (55). — С. 1–5.

75. Ульянова, Л. В. Вклад естественных и искусственных источников ионизирующего излучения в дозовую нагрузку персонала и населения Миллеровского района / Л. В. Ульянова, В. А. Локтева, Н. Д. Воробьева, Г. Г. Шопина // Здоровье и образование в XXI Веке, 2011. — Т. 13. — № 11. — С. 502–503.

76. Хвастунов, С. А. Оценка радоноопасности детских общеобразовательных учреждений г. Великий Устюг Вологодской области / С. А. Хвастунов, В. И. Коноплев // Гигиена окружающей и производственной среды, 2009. — № 3 (32). — С. 68–70.

77. Ховалыг А. А. Оценка сезонных вариаций объемной активности радона-222 в помещениях села Мугур-Аксы // Современные наукоемкие технологии, 2014. — № 7–2. — С. 81–82.

78. Цапалов, А. А. Зависимость объемной активности радона в помещениях от разности внутренней и наружной температур воздуха / А. А. Цапалов, С. И. Кувшинников // АНРИ, 2008. — № 2 (53). — С. 37–43.

79. Чеховский, А. Л. Годовые эффективные дозы облучения населения от радона на территории Гомельской области // Theoretical & Applied Science, 2016. — № 9 (41). — С. 132–137.

80. Чеховский, А. Л. Картирование территории Гомельской, Могилёвской и Витебской областей по комплексному радоновому показателю и объёмной активности радона в жилых зданиях / А. Л. Чеховский А. Л., Д. Н. Дроздов // Радиация и риск, 2016. — Т. 25. — № 4. — С. 126–136.

81. Чунихин, Л. А. Методика по оценке радоновой опасности территории и определению критических зон радоноопасности / Л. А. Чунихин, А. Л. Чеховский, Д. Н. Дроздов // Theoretical & Applied Science, 2016. — № 3 (35). — С. 107–112.

82. Чунихин, Л. А. Оптимизация подхода к оценке радоноопасности территории республики Беларусь / Л. А. Чунихин, А. Л. Чеховский, Д. Н. Дроздов // Theoretical & Applied Science, 2014. — № 9 (17). — С. 85–88.

83. Шилин, А. А. Гидроизоляция подземных и заглубленных сооружений при строительстве и ремонте : уч. пособие / А. А. Шилин, Зайцев М. В., Золотарев И. А., Ляпидевская О. Б. — Тверь: Русская торговая марка, 2003. — 396 с

84. Яблоков, А. В. Миф о безопасности малых доз радиации: Атомная мифология / А. В. Яблоков. — М.: Центр экологической политики России, ООО «Проект-Ф», 2002. — 145 с.

85. Яковлева, В. С. Развитие технологии радиационного мониторинга в городской среде / В. С. Яковлева, П. М. Нагорский // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки, 2015. — № 1 (10). — С. 65–71.

86. Ярмошенко, И. В. Обследование уровней накопления радона в жилых зданиях города Екатеринбурга / И. В. Ярмошенко, А. Д. Онищенко, М. В. Жуковский // Вопросы радиационной безопасности, 2010. — № 3(59). — С. 62–69.

87. Ярмошенко, И. В. Оценка радиационного ущерба здоровью населения северной части Восточно-Уральского радиоактивного следа на основе анализа продолжительности жизни / И. В. Ярмошенко, А. А. Селезнев, М. В. Жуковский, Л. Г. Коньшина // Медицинская радиология и радиационная безопасность, 2010. — Т. 55. — № 5. — С. 24–30.

88. Ярмошенко, И. В. Проблемы оптимизации защиты от радона и введения референтного уровня в Российской Федерации / И. В. Ярмошенко, А. Д. Онищенко, М. В. Жуковский // Радиационная гигиена, 2014. — Т. 7. — № 4. — С. 67–71.

89. Ярмошенко, И. В. Радон как фактор облучения населения России // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии, 2017. — № 2 (18). — С. 108–116.

90. Abd El-Zaher M. 2011 Seasonal variation of indoor radon concentration in dwellings of Alexandria city, Egypt *Radiation Protection Dosimetry* **143** (1). pp. 56–62.

91. Akerblom G. The use of airborne radiometric and exploration survey data and techniques in radon risk mapping in Sweden In: International Atomic Energy Agency, IAEA TEC DOC-827 pp. 159–180.

92. Algin E., Asici C., Sogukpinar H., Akkurt N. 2019 A case study on the use of seasonal correction factors for indoor radon measurements *Radiation Protection Dosimetry* **183** (4) pp. 423–431.

93. Ali Rahimi S., Nikpour B. 2014 Measurement of potential alpha energy exposure and potential alpha energy concentration and estimating radiation dose of radon in Sari city in the north region of Iran *Radiation Protection Dosimetry* **162** (3) pp. 382–387.

94. Amin A., Leghrouz M., Abu-Samreh M., Ayah Shehadeh K. 2012 Seasonal variation of indoor radon-222 levels in dwellings in Ramallah province and East Jerusalem suburbs, Palestine *Radiation Protection Dosimetry* **148** (2) pp. 268–273.

95. Andersen C., Ulbak K., Damkjær A., Kirkegaard P. and Gravesen P. 2001 Mapping indoor radon-222 in Denmark: Design and test of the statistical model used in the second nationwide survey *The Science of the Total Environment* **272** pp. 231–241.

96. Ashok G. V., Nagaiah N., Shiva Prasad N. G. 2012 Indoor radon concentration and its possible dependence on ventilation rate and flooring type *Radiation Protection Dosimetry* **148** (1) pp. 92–100.

97. Arvela H., Holmgren O., Hänninen P. 2016 Effect of soil moisture on seasonal variation in indoor radon concentration: modelling and measurements in 326 Finnish houses *Radiation Protection Dosimetry* **168** (2) pp. 277–290.
98. Arvela H., Holmgren O., Reisbacka H. 2010 Radon prevention in new construction in Finland: a nationwide sample survey in 2009 *Radiation Protection Dosimetry* **148** (4) pp. 465–474.
99. Bakaeva N. V., Kalaydo A. V. 2017 Prediction of radon concentrations in above-ground apartments *International Journal of Applied Engineering Science* **15**, art. 442 pp. 280–286. DOI:10.5937/jaes15–14656.
100. Barros N., Field D., Steck D. J., Field R. W. 2015 Comparative survey of outdoor, residential and workplace radon concentrations *Radiation Protection Dosimetry* **163** (3) pp. 325–332.
101. Barros N., Steck D. J., William Field R. 2016 Utility of short-term basement screening radon measurements to predict year-long residential radon concentrations on upper floors *Radiation Protection Dosimetry* **171** (3) pp. 405–413.
102. Beck T. R. 2017 Risks and radiation doses due to residential radon in Germany *Radiation Protection Dosimetry* **175** (4) pp. 466–472.
103. Bergman L., Lee J., Sadi B., Chen J. 2015 Radon exhalation from sub-slab aggregate used in home construction in Canada *Radiation Protection Dosimetry* **164** (4) pp. 606–611.
104. Bjorn P. J. 2012 Development of a model for radon concentration in indoor air *Science of the Total Environment* **416** pp. 343–350.
105. Bode Tushe K., Bylyku E., Xhixha G., Dhoqina P., Daci B. 2016 First step towards the geographical distribution of indoor radon in dwellings in Albania *Radiation Protection Dosimetry* **172** (4) pp. 488–495.
106. Bucci S., Pratesi G., Viti M. L. 2011 Radon in workplaces: first results of an extensive survey and comparison with radon in homes *Radiation Protection Dosimetry* **145** (2–3) pp. 202–205.
107. Bulanek B., Hulka J., Jilek K., Stek I. 2015 The portable device for continual measurement of radon progenies on filter using the detector Timepix *Radiation Protection Dosimetry* **164** (4) pp 493–496.
108. Bulanek B., Jilek K. and Cermak P. 2014 Measurement of radon progenies using the Timepix detector *Radiation Protection Dosimetry* **160** (1–3) pp 184–187.
109. Bulko M., Holy K., Pohronska Z., Mullerova M., Bohm M. 2017 Radiation exposure of the population from ^{222}Rn and other natural radionuclides around Mochovce nuclear power plant, Slovakia *Radiation Protection Dosimetry* **177** (1–2) pp. 207–212.
110. Buompane R., Roca V., et al 2014 ^{222}Rn + ^{220}Rn monitoring by alpha spectrometry *Radiation Protection Dosimetry* **160** (1–3) pp 173–176.
111. Burghele B. D., Cucos A., Papp B., Florin A., Stetca A., Mirea I. 2018 Distribution of radon gas in Romanian show caves and radiation safety *Radiation Protection Dosimetry* **181** (1) pp. 1–5

112. Chen J. 2017 Comparative study of radon exposure in Canadian homes and uranium mines — a discussion on the importance of national radon program *Radiation Protection Dosimetry* **177 (1–2)** pp 83–86.
113. Chen J., Moir D. 2012 Assessment of test duration effect in indoor radon measurement by Monte Carlo simulations *Radiation Protection Dosimetry* **150 (2)** pp. 248–258.
114. Chen J., Moir D., Schroth E. 2012 Cross-Canada Survey of Radon Concentrations in Homes — Final Report *Radiation Protection Dosimetry* **151 (1)** pp. 143–158.
115. Chen J., Schroth E., MacKinlay E., et. al 2009 Simultaneous ^{222}Rn and ^{220}Rn measurements in Winnipeg, Canada *Radiation Protection Dosimetry* **134(2)** pp. 75–78.
116. Clouvas A., Leontaris F., Xanthos S., Alifragis D. 2017 Radon migration in soil and its relation to terrestrial gamma radiation in different locations of the Greek early warning system network *Radiation Protection Dosimetry* **175 (1)** pp. 124–133.
117. Clouvas A., Takoudis G., Xanthos S. 2009 Indoor radon measurements in areas of northern Greece with relatively high indoor radon concentrations *Radiation Protection Dosimetry* **136 (2)** pp. 127–131.
118. Cohen B. L. 2002 Cancer risk from low-level radiation *American journal of rentgenology* **179 (5)** pp 1137–1143.
119. 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. *British Medical Journal* **330** pp. 223–227.
120. Darby S., Deo H., Doll R. 2001 A parallel analysis of individual and ecological data on residential radon and lung cancer in south-west England *J. R. Stat Soc A* 164 (1) pp. 193–203.
121. Darby S., Hill D., Doll R. 2001 Radon: A likely carcinogen at all exposures *Annals of Oncology* **12** pp. 1341–1351.
122. De Cicco F., Roca V. and Sabbarese C. 2014 Track counting and thickness measurement of LR115 radon detectors using a commercial image scanner *Radiation Protection Dosimetry* **162 (3)** pp 388–393.
123. Epstein L., Koch J., Riemer T., Orion I., Haquin G. 2014 Radon concentrations in different types of dwellings in Israel *Radiation Protection Dosimetry* **162 (4)** pp 605–608.
124. Espinosa G., Golzarri J. I., Angeles A., Griffith R. V. 2009 Nationwide survey of radon levels in indoor workplaces in Mexico using nuclear track methodology *Radiation Measurement* **44** pp. 1051–1054.
125. Fenton D. 2011 An overview of Ireland's National Radon Policy *Radiation Protection Dosimetry* **145 (2–3)** pp. 96–100.
126. Fronka A. 2011 Indoor and soil gas radon simultaneous measurements for the purpose of detail analysis of radon entry pathways into houses *Radiation Protection Dosimetry* **145 (2–3)** Pp. 117–122.

127. Garbero V., Dellacasa G., Bianchi D. et. al 2009 Outdoor radon concentration measurements: some correlation with major urban pollutants *Radiation Protection Dosimetry* **137(3–4)** pp. 332–335.
128. Gier S., Meisenberg O., Feistenauer P. and Tschiersch J. 2014 Thoron and thoron progeny measurements in German clay houses *Radiation Protection Dosimetry* **160 (1–3)** pp. 160–163.
129. Green B., Miles J., Bradley E. and Rees D. 2002 Radon Atlas of England and Wales In: NRPB-W26, Didcot, UK: National Radiological Protection Board. 75 p.
130. Gruber V., Ringer W., Gräser J. et. al 2014 Comprehensive investigation of radon exposure in Austrian tourist mines and caves *Radiation Protection Dosimetry* **162 (1–2)** pp. 78–82.
131. Hansen M. F., Moss G. R., Fews A. P., Henshaw D. L. 2014 Improving the uncertainty on short-term radon measurements using PADC detector *Radiation Protection Dosimetry* **160 (1–3)** pp. 181–183.
132. Harley N., Chittaporn P., Marsicano A. 2011 Residential radon remediation: performance over 17 years *Radiation Protection Dosimetry* **145 (2–3)** pp. 194–197.
133. Hoffmann M., Feyzullayev A., Baghirli R. J., Veliyeva F. 2017 First Map of Residential Indoor Radon Measurements in Azerbaijan *Radiation Protection Dosimetry* **175 (2)** pp.186–193.
134. Hui Bin Li, MingYan Jia, Guo Shen Li and Yin Dong Wang 2012 A continuous plutonium aerosol monitor for use in high radon environments *Radiation Protection Dosimetry* **148(2)** pp. 258–262.
135. Hultqvist B. 1956 Studies on naturally occurring ionizing radiation *Svenska Vetensk Akad. Hadl* **6 (3)**. Stockholm.
137. IAEA SAFETY STANDARTS for protecting people and the environment. Protection of the Public against Exposure Indoors due to Natural Sources of Radiation. Draft Safety Guide No. DS421. Vienna, April 2012. 92 p.
138. ICRP: Protection against radon-222 at home and work. International Commission on Radiological Protection Publication 65. Pergamon, 1994. 89 p.
139. ICRP Publication 115. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon / ed. C.H. Clement // *Annals of the ICRP*. — 2010. — Vol. 40 (1). — 64 p.
140. International Agency for Research on Cancer (IARC). Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Vol 43; Man-made Mineral Fibres and Radon. Lyon. 1988. 163 p.
141. International Agency for Research on Cancer (IARC). Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Vol 78. Ionizing Radiation. Part 5. Some Internally Deposited Radionuclides. Lyon. 2001. 147 p.
142. Janik M., Al-Azmi D., Sahoo S. K. 2018 The screening indoor radon and preliminary study of indoor thoron concentration levels in Kuwait *Radiation Protection Dosimetry* **181 (3)** pp. 246–254.

143. Janik M., Tokonami S., Kranrod S., et al. 2013 Comparative analysis of radon, thoron and thoron progeny concentration measurements *Journal of Radiation Research* **54** pp 597–610.
144. Janik M., Yonehara H. 2015 The most recent international intercomparisons of radon and thoron monitors with the NIRS radon and thoron chambers *Radiation Protection Dosimetry* **164** (4) pp 595–600.
145. Jensen C. L., Strand T., Ramberg G. B., Ruden L., Ånestad K. The Norwegian radon mapping and remediation program. 11th International Congress of the International Radiation Protection Association, Madrid, Spain; Paper 6a61, 23–28 May, 2004. www.irpa11.com.
146. Jílek K., Timkova J. 2015 Intercomparison of radon/thoron gas and radon short-lived decay products measuring instruments in the NRPI Prague *Radiation Protection Dosimetry* **164** (4) pp 556–562.
147. Karadeniz O., Yaprak G., Akal C., Emen I. 2012 Indoor radon measurements in the granodiorite area of Bergama *Radiation Protection Dosimetry* **149** (2) pp. 147–154.
148. Kavasi N., Kobayashi Y., Kovacs T. 2011 Effect of radon measurement methods on dose estimation *Radiation Protection Dosimetry* **145** (2–3) pp. 224–232.
149. Kendall G. M., Smith T. J. 2002 Doses to organs and tissues from radon and its decay products *Journal of Radiological Protection* **22**, pp. 389–406.
150. Khorzova L. I., Sidyakin P. A., Yanukyan E. G. 2016 Radiation situation at construction sector objects in Caucasus Mineral Waters region and prospects of its decrease, *Procedia Engineering 2: Second International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016* pp. 2031–2035.
151. Kim Y., Chang B.-U., Park H.-M. et. al. 2011 National radon survey in Korea *Radiation Protection Dosimetry* **146** (1–3) pp. 6–10.
152. Kobeissi M. A., El-Samad O., Rachidi I. 2013 Health assessment of natural radioactivity and radon exhalation rate in granites used as building materials in Lebanon *Radiation Protection Dosimetry* **153** (3) pp. 342–351.
153. Koray A, Akkaya G., Kahraman A., Kaynak G. 2014 Measurements of radon concentrations in waters and soil gas of Zonguldak, Turkey *Radiation Protection Dosimetry* **162** (3) pp. 375–381.
154. Kunovska B., Ivanova K., Badulin V., Cenova M., Angelova A. 2018 Assessment of residential radon exposure in Bulgaria *Radiation Protection Dosimetry* **181** (1) pp. 34–37
155. Lee E. R., Chang B. U., Kim Y. J. 2018 Radon survey in school and estimation of effective dose using corrected radon concentration *Radiation Protection Dosimetry* **179** (2) pp. 101–107.
156. Leghrouz A., Abu-Samreh M. and Shehadeh A. 2012 Seasonal variation of indoor radon-222 levels in dwellings in Ramallah province and East Jerusalem suburbs, Palestine *Radiation Protection Dosimetry* **148**(2) pp. 268–273

157. Licour C., Tondeur F., Gerardy I., Medaghri Alaoui N., Dubois N. 2017 ^{226}Ra , ^{222}Rn and permeability of Belgian soils in relation with indoor radon risk *Radiation Protection Dosimetry* **177** (1–2) pp. 168–172.
158. Louro A., Peralta L., Soares S. 2013 Human exposure to indoor radon: a survey in the region of Guarda, Portugal *Radiation Protection Dosimetry* **154** (2) pp. 237–244.
159. Lucas H. F. 1957 Improved low-level alpha scintillation counter for radon *Rev. Scientific Instr* **28** pp. 680–683.
160. Makelainen I., Moisio S., Reisbacka S., Turtiainen H. 2002 Indoor occupancy and radon exposure in Finland *Radioactivity in the Environment*. Vol. 7. Seventh International Symposium on the Natural Radiation Environment, Rhodes, Greece, 20–24 May 2002. Pp. 687–693.
161. Malki A., Lavi N., Moinester M., et al. 2012. Measurement of radon diffusion length in thin membranes *Radiation Protection Dosimetry* **150** (4) pp. 434–440.
162. Marsh J. W., Birchall A. 2002 Sensitivity analysis of the weighted equivalent lung dose per unit exposure from radon progeny *Radiation Protection Dosimetry* **87**. pp 167–178.
163. Mitev K., Georgiev S., et al. 2014 A high-sensitivity method for the measurement of ^{222}Rn based on liquid scintillation counting of polycarbonate powder. *Radiation Protection Dosimetry* **160** (1–3) pp. 188–191.
164. Moed B. A., Nazaroff W. W., Nero A. V., et al. 1984 Identifying areas with potential for high indoor radon level *Report LBL 16955*. Berkley, C. A. 176 p.
165. Mostafa Y., Vasyanovich M., Zhukovsky M., Zaitceva N. 2015 Calibration system for radon EEC measurements *Radiation Protection Dosimetry* **164** (4) pp. 587–590.
166. Mullerova M., Mazur J., Csordas A., Grzadziel D., Holy K. 2017 Preliminary Results of Radon Survey in the Kindergartens of V4 Countries *Radiation Protection Dosimetry* **177** (1–2) pp. 95–98.
167. National Academy of Sciences. Health Effects of Exposure to Radon (BEIR VI). National Academy Press, Washington, D. C., 2000.
168. Nikolic J., Pantelic G., Zivanovic M., Rajacic M., Todorovic D. 2014 Comparison of two methods for high purity germanium detector efficiency calibration for charcoal canister radon measurement *Radiation Protection Dosimetry* **162** (1–2) pp. 47–51.
169. Niranjan R. S., Ningappa C., Yashaswini T. 2018 Concentration of radon in dwellings of Hemavathi river Basin, Karnataka, India *Radiation Protection Dosimetry* **181** (3) pp. 269–276.
170. Obed R. I., Ademola A. K., Ogundare F. O. 2012 Radon measurements by nuclear track detectors in dwellings in Oke-Ogun area, South-Western, Nigeria. *Radiation Protection Dosimetry* **148** (4) pp. 475–481.

171. Oikawa S., Kanno N., Sanada T., Abukawa J., Higuchi H. A. 2006 Survey of indoor workplace radon concentration in Japan *International Environment Radiation* **87**. pp. 239–245.
172. Papp B., Cucos (Dinu) A., Cosma C. 2018 A comprehensive study of residential, geogenic and water radon in the north area of Mures county, Romania *Radiation Protection Dosimetry* **179 (1)** pp. 80–86.
173. Pavlenko T. A., Los I. P., Aksenov N. V. 2000 Indoor ²²²Rn levels and irradiation doses in the territory of the Ukraine *Radiation measurement* **4 (26)** pp. 585–592.
174. Pereira C. E., Vaidyan V. K., Chougankar M. P. et. al 2012 Indoor radon and thoron levels in Neendakara and Chavara regions of Southern Coastal Kerala, India *Radiation Protection Dosimetry* **150(3)** pp. 385–390.
175. Porstendorfer J., Dankelmann V., Pagelkopf P. In: Proc. 3rd Euro-symposium on Protection Against Radon. Belgium, Liege, AIM, University of Liege, 2001. 65 p.
176. Poulin P., Leclerc J.-M., Dessau J.-C., et. al. 2012 Radon measurement in schools located in three priority investigation areas in the province of Quebec, Canada *Radiation Protection Dosimetry* **151(2)** pp. 278–289.
177. Quarto M., Pugliese M., Loffredo F., Roca V. 2013 Indoor radon concentration measurements in some dwellings of the Penisola Sorrentina, South Italy *Radiation Protection Dosimetry* **156 (2)** pp. 207–212.
178. Quarto M., Pugliese M., Loffredo F., La Verde G., Roca V. 2017 Indoor radon activity concentration measurements in the great historical museums of University of Naples, Italy *Radiation Protection Dosimetry* **174 (1)** pp.123–132.
179. Radolich V., Miklavchich I., Stanich D. et. al 2014 Identification and mapping of radon-prone areas in Croatia — preliminary results for Lika-Senj and the southern part of Karlovac counties *Radiation Protection Dosimetry* **162 (1–2)** pp. 29–33.
180. Radon and its decay products in indoor air. Edited by William W. Nazaroff, Anthony V. Nero, Jr // Environmental Science and Technology: A Wiley-Interscience Series of Texts and Monographs. 1988. 517 p.
181. Radon: Radon Research Program, FY 2000. — Washington: US Dept. Energy — Oak Ridge Inst., 1993.
182. Rafique M., Rahman S. U., Rahman S. et. al 2010 Assessment of indoor radon doses received by the students in the Azad Kashmir schools, Pakistan *Radiation Protection Dosimetry* **142 (2–4)** pp. 339–346.
183. Rafique M., Rahman S., Rahman S. U. et. al 2010 Indoor radon concentration measurement in the dwellings of district Poonch (Azad Kashmir), Pakistan *Radiation Protection Dosimetry* **138 (2)** pp. 158–165.
184. Rakesh Chand Ramola 2011 Survey of radon and thoron in homes of Indian Himalay *Radiation Protection Dosimetry* **146 (1–3)** pp. 11–13.

185. Rani A., Singh S., Dugga V. 2013 Indoor radon measurements in the dwellings of Punjab and Himachal Pradesh, India *Radiation Protection Dosimetry* **156** (1) pp. 118–124.
186. Rossetti M., Esposito M. 2015 Radon levels in underground workplaces: a map of the Italian regions *Radiation Protection Dosimetry* **164** (3) pp. 392–397.
187. Sainz-Fernandez C., Fernandez-Villar A., Fuente-Merino I. et al 2014 The Spanish indoor radon mapping strategy *Radiation Protection Dosimetry* **162** (1–2) pp. 58–62.
188. Sanchez M. A., de la Torre Perez J. and Sanchez R. B. 2014 Experimental studies about the ratio between ^{210}Po deposited on surfaces and retrospective indoor ^{222}Rn concentrations *Radiation Protection Dosimetry* **160** (1–3) pp 206–209.
189. Sathish L. A., Nagaraja K., Ramachandran T. V. 2012 Indoor ^{222}Rn and ^{220}Rn concentrations and doses in Bangalore, India *Radiation Protection Dosimetry* **151**(2) pp. 344–353.
190. Scott A. G. Modeling radon sources and ingress / The 2000 International Radon Conference (1993). Vol. IV. Pp. 66–74.
191. Smetsers R. C., Blaauboer R. O., Dekkers F., Slaper H. 2018 Radon and thoron progeny in Dutch dwellings *Radiation Protection Dosimetry* **181** (1) pp. 11–14.
192. Sogukpinar H., Algin E., Asici C., Altinsoz M., Cetinkaya H. 2014 Seasonal indoor radon concentration in Eskisehir, Turkey *Radiation Protection Dosimetry* **162** (3) pp 410–415.
193. Stajic J. M., Nikezic D. 2015 Analysis of radon and thoron progeny measurements based on air filtration *Radiation Protection Dosimetry* **163** (3) pp. 333–340.
194. Strand T., Ånestad K., Ruden L., Ramberg G. B., Jensen C. L., Wiig A. H., et al. Indoor radon survey in 114 municipalities. StrålevernRapport 2001:6, Østerås, Norwegian Radiation Protection Authority; 2001.
195. Sundal A. V., Henriksen H., Lauritzen S. E., Soldal O., Strand T., Valen V. 2004a Geological and geochemical factors affecting radon concentrations in dwellings located on permeable glacial sediments — a case study from Kinsarvik, Norway *Environmental Geology* **45**. pp. 843–858.
196. Sundal A. V., Jensen C. L., Ånestad K., Strand T. 2007 Anomalous high radon concentrations in dwellings located on permeable glacial sediments. *J Radiol Prot* **27**. pp. 1–12.
197. Sundal A. V., Valen V., Soldal O., Strand T. 2008 The influence of meteorological parameters on soil radon levels in permeable glacial sediments. *Scientific Total Environment* **389** pp. 418–28.
198. Synnott H., Fenton D. 2005 An Evaluation of Radon Reference Levels and Radon Measurement Techniques and Protocols in Europe Countries In:

European Radon Research and Industry Collaboration Concerted Action (ERRICCA 2). European Commission Contract: FIRI-CT-2001–20142. 27 p.

199. Suzuki G., Yamaguchi I., Ogata H. 2010 A Nation-Wide Survey on Indoor Radon from 2007 to 2010 in Japan *Journal of Radiation Research* **51** pp. 683–689.

200. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2–4).

201. Thinova L., Bican R., Fronka A., Johnova K., Solc J. 2017 Radon concentration in the area of Waste Rock dumps, Brod, CR-case study *Radiation Protection Dosimetry* **177** (1–2) pp. 149–154.

202. Tondeur F., Cinelli G., Dehandschutter B. 2015 High radon areas in the Walloon region of Belgium *Radiation Protection Dosimetry* **164** (4) pp. 563–568.

203. UNSCEAR, 1982: Sources and Effects of Ionizing Radiation. Report to the General Assembly with Annexes. New York, 1982. 115 p.

204. Wu Y, Cui H., Zhang O., Shang B. 2015 Intercomparisons for integrating the radon–thoron detector of NIRP, China with NIRS, Japan. *Radiation Protection Dosimetry* **164** (3) pp 398–401.

205. Yakut H., Tabar E., Yıldırım E., Zenginler Z., Ertugral F. 2017 Soil gas radon measurement around fault lines on the western section of the north Anatolian fault zone in Turkey *Radiation Protection Dosimetry* **173** (4) pp. 405–413.

206. Yuan Y., Morishima H., Shen T. et. al 2000 Measurements of Rn-222, Rn-220 and Their Decay Products in the Environmental Air of the High Background Radiation Areas in Yangjiang, China *Journal of Radiation Research* **41** pp. 25–30.

207. Zhiwei C., Mingyan J. and Maoquan S. 2015 Measuring the activity of inhaled ²²²Rn using a lung counting system. *Radiation Protection Dosimetry* 163 (2). Pp. 222–225.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ГУЛАБЯНЦА ЛОРЕНА АРАМОВИЧА

1. Гулабянц, Л. А. Основные принципы противорадоновой защиты зданий // АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений, 1994. — № 2. — С. 32–35.
2. Гулабянц, Л. А. Структура и развитие комплекса нормативно-технических документов по радиационной экологии строительства // АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений, 1995. — № 3/4. — С. 95–105.
3. Гулабянц, Л. А. Рекомендации по проектированию противорадоновой защиты жилых и общественных зданий // АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений, 1996/97. — № 5 (11). — С. 58–67.
4. МГСН 2.02–97. Допустимые уровни ионизирующего излучения и радона на участках застройки / Руководитель разработки Л. А. Гулабянц // Приняты и введены в действие постановлением Правительства Москвы от 4 февраля 1997 г. № 57. — 8 с.
5. Пособие к МГСН 2.02–97. Проектирование противорадоновой защиты жилых и общественных зданий / Разработано НИИ строительной физики (НИИСФ) Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), автор — проф., докт. техн. наук Гулабянц Л. А. // Утверждено указанием Москомархитектуры от 20 февраля 1998 г. № 7. — 19 с.
6. Гулабянц, Л. А. Методологические подходы к гигиенической оценке радонобезопасности территорий застройки в г. Москве / Л. А. Гулабянц, С. И. Иванов, С. Е. Охрименко // АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений, 2000. — № 1 (20). — С. 24–30.
7. Гулабянц, Л. А. Программа GeoBuilder как инструмент радонового картографирования // АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений, 2000. — № 2 (21). — С. 60–62.
8. Гулабянц, Л. А. Мощность «активного» слоя грунта при диффузионном переносе радона в грунтовом основании здания / Л. А. Гулабянц, Б. Ю. Заболоцкий // АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений, 2001. — № 4 (27). — С. 38–40.
9. Павлов, И. В. Задачи и методы радиационного контроля при строительстве зданий / И. В. Павлов, Л. А. Гулабянц, С. И. Иванов, С. Е. Охрименко, А. М. Маренный // АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений, 2003. — № 3 (34). — С. 2–12.

10. Гулябьянц, Л. А. Плотность потока радона как критерий оценки / Л. А. Гулябьянц, Б. Ю. Заболотский // АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений, 2004. — № 3 (38). — С. 16–20.
11. Гулябьянц, Л. А. Сезонная вариация потока радона из грунта и оценка радоноопасности площади застройки / Л. А. Гулябьянц, Б. Ю. Заболотский // АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений, 2004. — № 4 (39). — С. 46–50.
12. Гулябьянц, Л. А. Теоретическая основа нестационарного метода измерения коэффициента диффузии радона в пористой среде / Л. А. Гулябьянц, М. И. Лившиц, А. А. Цапалов // АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений, 2006. — № 2 (45). — С. 43–45.
13. Гулябьянц, Л. А. Экспериментальное устройство для измерения коэффициента диффузии радона в материалах / Л. А. Гулябьянц, А. А. Цапалов // АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений, 2006. — № 4 (47). — С. 35–37.
14. Гулябьянц, Л. А. Расчет концентрации радона в помещениях проектируемых зданий / Л. А. Гулябьянц, М. И. Лившиц // АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений, 2007. — № 4 (51). — С. 9–13.
15. Гулябьянц, Л. А. Определение коэффициента диффузии радона в бетоне и изоляционных материалах / Л. А. Гулябьянц, А. А. Цапалов // АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений, 2008. — № 2 (53). — С. 44–48.
16. Гулябьянц, Л. А. Моделирование радонового режима здания // АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений, 2008. — № 2 (53). — С. 52–55.
17. Гулябьянц, Л. А. Радонопроницаемость рулонного материала техноласт / Л. А. Гулябьянц, А. А. Цапалов // Строительные материалы, 2008. — № 10. — С. 69–71.
18. Гулябьянц, Л. А. Радонозащитные свойства гидроизоляционного материала на основе бетонита / Л. А. Гулябьянц, А. А. Цапалов // Строительные материалы, 2009. — № 2. — С. 67–69.
19. Гулябьянц, Л. А. Принципы построения новых норм проектирования противорадоновой защиты зданий // Academia. Архитектура и строительство, 2009. — № 5. — С. 461–467.
20. Гулябьянц, Л. А. Определение требуемой радонозащитной способности подземных ограждающих конструкций зданий // Жилищное строительство, 2009. — № 7. — С. 34–38.
21. Гулябьянц, Л. А. Казусы нормативно-методического обеспечения радиационной безопасности зданий // Жилищное строительство, 2010. — № 5. — С. 63.
22. Цапалов, А. А. Принцип оценки среднегодовой ЭРОА радона в зданиях по результатам краткосрочных измерений // А. А. Цапалов,

А. П. Ермилов, Л. А. Гулабянц, А. Т. Губин С. И. Кувшинников // Радиационная гигиена, 2010. — Т. 3. — № 3. — С. 23–27.

23. Гулабянц, Л. А. Радонопроницаемость тяжелого бетона / Л. А. Гулабянц, А. А. Цапалов // Жилищное строительство, 2011. — № 1. — С. 39–41.

24. Гулабянц, Л. А. Метод расчета требуемого сопротивления радонопроницанию подземных ограждающих конструкций зданий // АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений, 2011. — № 4 (67). — С. 26–32.

25. Гулабянц, Л. А. Новый подход к решению проблемы защиты зданий от радона // АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений, 2011. — № 4 (67). — С. 26–32.

26. Гулабянц, Л. А. Казусы нормативно-методического обеспечения радиационной безопасности зданий // Жилищное строительство, 2012. — № 2. — С. 28–31.

27. Гулабянц, Л. А. Противорадоновая защита жилых и общественных зданий (Пособие по проектированию, проект). Часть I // Жилищное строительство, 2012. — № 1. — С. 25–30.

28. Гулабянц, Л. А. Противорадоновая защита жилых и общественных зданий (Пособие по проектированию, проект). Часть II // Жилищное строительство, 2012. — № 3. — С. 27–31.

29. Гулабянц, Л. А. Противорадоновая защита жилых и общественных зданий (Пособие по проектированию, проект). Часть III // Жилищное строительство, 2012. — № 5. — С. 28–32.

30. Гулабянц, Л. А. Противорадоновая защита жилых и общественных зданий (Пособие по проектированию, проект). Часть IV // Жилищное строительство, 2012. — № 6. — С. 82–85.

31. Радоноопасность. Термины, критерии, признаки // АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений, 2013. — № 1 (72). — С. 12–14.

31. Лившиц, М. И. Метод определения радонопроницаемости материалов ограждающих конструкций / М. И. Лившиц, Л. А. Гулабянц, А. А. Цапалов // Жилищное строительство, 2013. — № 1. — С. 34–35.

32. Гулабянц, Л. А. Пособие по проектированию противорадоновой защиты жилых и общественных зданий. — М. : НО «ФОН-НАУКА», 2013. — 52 с.

33. Гулабянц, Л. А. Роль радона в сфере жизнедеятельности человека // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии, 2013. — № 4 (4). — С. 78–82.

34. Гулабянц, Л. А. Радоноопасность. Термины, критерии, признаки // АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений, 2014. — № 1 (76). — С. 22–28.

35. Гулябянц, Л. А. Особенности распределения концентрации радона в основании здания / Л. А. Гулябянц, М. И. Лившиц // Основания, фундаменты и механика грунтов, 2014. — № 5. — С. 21–24.

36. Gulabyants L. A., Livshits M. I. Characteristics of radon-concentration distribution in the bed of a building // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2014. Vol. 51. No. 5. Pp. 248–252.

37. Гулябянц, Л. А. Радонозащитная способность ограждающих конструкций зданий и сокращение неоправданных затрат при строительстве // Жилищное строительство, 2015. — № 6. — С. 68.

38. Гулябянц, Л. А. Заинтересованность в энергосбережении у жильцов есть... // Энергосбережение, 2016. — № 1. — С. 26–31.

39. Гулябянц, Л. А. Определение радоновой нагрузки на подземные ограждающие конструкции здания / Л. А. Гулябянц, М. И. Лившиц, С. В. Медведев // Academia. Архитектура и строительство, 2016. — № 1. — С. 122–128.

40. Гулябянц, Л. А. Инженерный метод прогностической оценки концентрации радона в проектируемом здании // Строительные материалы, 2016. — № 6. — С. 50–54.

41. Гулябянц, Л. А. Математическая модель формирования радоновой обстановки в здании / Л. А. Гулябянц, А. В. Калайдо, М. И. Лившиц // АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений, 2017. — № 1 (88). — С. 41–49.

42. Гулябянц, Л. А. Мониторинг и анализ нормативных документов в строительстве в области внутреннего климата помещений и защиты от вредных воздействий. Часть 4. Радонобезопасность / Л. А. Гулябянц, А. В. Спиридонов, И. Л. Шубин // БСТ: Бюллетень строительной техники, 2017. — № 2 (990). — С. 49–53.

43. Гулябянц, Л. А. Оценка влияния эффектов термо- и бародиффузии на перенос радона в пористой среде / Л. А. Гулябянц, А. В. Калайдо, М. Н. Семенова // АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений, 2017. — № 1 (92). — С. 62–69.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

**Коэффициент сдвига радиоактивного равновесия ДПР
во внутреннем воздухе при различных кратностях
воздухообмена**

$n, \text{ч}^{-1}$	$n \cdot 10^5, \text{с}^{-1}$	F	$n, \text{ч}^{-1}$	$n \cdot 10^5, \text{с}^{-1}$	F
1	2	3	1	2	3
0	0,00	0,79	1,6	4,44	0,37
0,1	2,78	0,74	1,7	4,72	0,36
0,2	5,56	0,70	1,8	5,00	0,35
0,3	8,33	0,66	1,9	5,28	0,34
0,4	11,1	0,62	2	5,56	0,33
0,5	13,9	0,59	2,1	5,83	0,32
0,6	16,7	0,56	2,2	6,11	0,32
0,7	19,4	0,53	2,3	6,39	0,31
0,8	22,2	0,50	2,4	6,67	0,30
0,9	25,0	0,48	2,5	6,94	0,30
1	27,8	0,46	2,6	7,22	0,29
1,1	30,6	0,44	2,7	7,50	0,28
1,2	33,3	0,42	2,8	7,78	0,28
1,3	36,1	0,40	2,9	8,06	0,27
1,4	39	0,39	3	8,33	0,26
1,5	41,7	0,38	3,1	8,61	0,25

**Расчет требуемых радонозащитных характеристик
ограждающих конструкций здания на стадии
проектирования**

Исходные (расчетные) данные:

Фундамент здания — железобетонный ростверк на свайном основании.

Цокольные стены:

- наружные — трехслойные железобетонные панели;
- внутренние — однослойные железобетонные панели.

Перекрытие подвала — однослойные железобетонные панели.

Толщина:

- наружных панелей — 300 мм;
- внутренних панелей — 180 мм;
- перекрытия — 200 мм;

Размеры модельного помещения (проект):

- длина $a = 6$ м;
- ширина $b = 4$ м;
- высота $h = 2,7$ м.

Конструкция пола подвала — сплошная плита из монолитного, армированного дорожной сеткой бетона кл. В20 толщиной $h = 50$ мм по втрамбованному в грунт щебню.

Кратность воздухообмена $n = 8,33 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ (0,3 ч⁻¹).

Характеристики бетона:

- удельная активность радия $A_{Ra \beta} = 25$ Бк/кг;
- плотность бетона $\rho_{\beta} = 2\,400$ кг/м³;
- коэффициент эманирования радона $k_{эм} = 0,25$;
- коэффициент диффузии радона $D_{\beta} = 1,1 \cdot 10^{-7}$ м²/с.

Грунт основания здания глинистый, активный слой расположен выше уровня первого постоянного водоносного горизонта.

Характеристики грунта:

- удельная активность радия $A_{Ra \text{ гр}} = 45$ Бк/кг;
 - плотность грунта $\rho_{гр} = 1\,950$ кг/м³;
 - коэффициент эманирования радона $k_{эм} = 0,45$;
 - коэффициент диффузии радона $D_{гр} = 7,0 \cdot 10^{-6}$ м²/с.
- ЭРОА радона в наружном воздухе* $ЭРОА_n = 10$ Бк/м³.

Требуемое значение ЭРОА радона в здании
 $ЭРОА_{mp} \leq 50 \text{ Бк/м}^3$.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ И ГРУНТА

1. Определяем радоновый потенциал грунта в основании здания

$$\Pi_{Rn} = A_{Ra} \cdot k_{эм} \cdot \rho_{зр} = 45 \cdot 0,45 \cdot 1950 = 39\,488 \text{ Бк/м}^3.$$

2. Находим геометрические характеристики помещения и его ограждающих конструкций

– объем помещения

$$V = a \cdot b \cdot h = 6 \cdot 4 \cdot 2,7 = 64,8 \text{ м};$$

– площадь внутренних стен

$$S_{вн ст} = 2h \cdot (a + b) = 2 \cdot 2,7 \cdot (6 + 4) = 54 \text{ м}^2;$$

– площадь наружных стен

$$S_{н ст} = S_{вн ст} = 54 \text{ м}^2;$$

– площадь верхнего перекрытия

$$S_{пер} = (a + b) = 6 \cdot 4 = 24 \text{ м}^2;$$

– площадь пола

$$S_{пол} = S_{пер} = 24 \text{ м}^2.$$

3. Сопротивление радонопроницанию конструкции пола по
(2.24)

$$R = \frac{1}{\sqrt{\lambda D_6}} \cdot sh \left(h \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{D_6}} \right) = \frac{1}{\sqrt{2,1 \cdot 10^{-6} \cdot 1,1 \cdot 10^{-7}}} \cdot sh \left(0,05 \cdot \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^{-6}}{1,1 \cdot 10^{-7}}} \right) = 4,58 \cdot 10^6 \text{ с/м}.$$

РАСЧЕТ ПЛОТНОСТЕЙ ПОТОКОВ РАДОНА В ПОМЕЩЕНИЕ

1. Плотность потока радона из грунта через горизонтальную подземную ограждающую конструкцию

$$q_{zp} = 1,3 \cdot \frac{P_{Rn}}{R} = 1,3 \cdot \frac{39,5 \cdot 10^3}{4,58 \cdot 10^6} = 8,6 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})^*.$$

*Множитель 1,3 представляет своего рода коэффициент запаса, учитывающий появление усадочных трещин и других негерметичностей в оболочке здания.

2. Плотность потока радона выделения радона в материале наружных стен

$$\begin{aligned} q_n &= A_{Ra} \rho_{\sigma} k_{эм} \cdot \sqrt{\lambda D_{\sigma}} \cdot \tanh \left(\frac{h_n}{2} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{D_{\sigma}}} \right) = \\ &= 25 \cdot 2400 \cdot 0,25 \cdot \sqrt{2,1 \cdot 10^{-6} \cdot 1,1 \cdot 10^{-7}} \cdot \tanh \left(\frac{0,3}{2} \cdot \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^{-6}}{1,1 \cdot 10^{-7}}} \right) = \\ &= 4,1 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}). \end{aligned}$$

3. Плотность потока радона выделения радона в материале внутренних стен

$$\begin{aligned} q_{вн} &= A_{Ra} \rho_{\sigma} k_{эм} \cdot \sqrt{\lambda D_{\sigma}} \cdot \tanh \left(\frac{h_{вн}}{2} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{D_{\sigma}}} \right) = \\ &= 25 \cdot 2400 \cdot 0,25 \cdot \sqrt{2,1 \cdot 10^{-6} \cdot 1,1 \cdot 10^{-7}} \cdot \tanh \left(\frac{0,18}{2} \cdot \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^{-6}}{1,1 \cdot 10^{-7}}} \right) = \\ &= 2,7 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}). \end{aligned}$$

4. Плотность потока радона выделения радона в материале перекрытия

$$q_{пер} = A_{Ra} \rho_{\sigma} k_{эм} \cdot \sqrt{\lambda D_{\sigma}} \cdot \tanh \left(\frac{h_{пер}}{2} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{D_{\sigma}}} \right) =$$

$$\begin{aligned}
 &= 25 \cdot 2400 \cdot 0,25 \cdot \sqrt{2,1 \cdot 10^{-6} \cdot 1,1 \cdot 10^{-7}} \cdot \tanh\left(\frac{0,2}{2} \cdot \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^{-6}}{1,1 \cdot 10^{-7}}}\right) = \\
 &= 3,0 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).
 \end{aligned}$$

5. Плотность потока радона выделения радона в материале плиты пола

$$\begin{aligned}
 q_{\text{пол}} &= A_{\text{Ra}} \rho_{\phi} k_{\text{эм}} \cdot \sqrt{\lambda D_{\phi}} \cdot \tanh\left(\frac{h_{\text{пол}}}{2} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{D_{\phi}}}\right) = \\
 &= 25 \cdot 2400 \cdot 0,25 \cdot \sqrt{2,1 \cdot 10^{-6} \cdot 1,1 \cdot 10^{-7}} \cdot \tanh\left(\frac{0,05}{2} \cdot \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^{-6}}{1,1 \cdot 10^{-7}}}\right) = \\
 &= 0,8 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).
 \end{aligned}$$

РАСЧЕТ ПРОГНОЗИРУЕМОЙ ЭРОА РАДОНА В ПОМЕЩЕНИИ

1. Определяем прогнозируемое значение эквивалентной равновесной объемной активности радона в помещении из уравнения радонового баланса

$$\begin{aligned}
 ЭРОА_{np} &= \left(\frac{q_{\text{вн}} S_{\text{вн}} + q_{\text{п}} S_{\text{п}} + q_{\text{неп}} S_{\text{неп}} + (q_{\text{сп}} + q_{\text{пол}}) \cdot S_{\text{пол}}}{V \cdot (\lambda + n)} + \frac{ЭРОА_{\text{п}} \cdot n}{\lambda + n} \right) \cdot F = \\
 &= \left(\frac{2,7 \cdot 54 + 4,1 \cdot 54 + 3 \cdot 24 + (8,6 + 0,8) \cdot 24}{64,8 \cdot (0,2 + 8,3) \cdot 10^{-5}} \cdot 10^{-3} + \frac{10 \cdot 8,3 \cdot 10^{-5}}{(0,2 + 8,3) \cdot 10^{-5}} \right) \cdot 0,4 = \\
 &= 43,0 \text{ Бк}/\text{м}^3.
 \end{aligned}$$

2. Сравниваем прогнозируемое значение с требуемым

$$ЭРОА_{np} < ЭРОА_{mp} = 50 \text{ Бк}/\text{м}^3.$$

Вывод: Сопротивление радонопроницанию конструкции пола достаточно для обеспечения требуемого значения ЭРОА радона в помещении, равного 50 Бк/м³.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Длина и эффективный коэффициент диффузии радона ($D_{эфф} = D/\varepsilon$) в различных материалах

Материал	Длина диффузии, L , м	Эффективный коэффициент диффузии $D_{эфф}$, m^2/c
Воздух*	2,18	$1 \cdot 10^{-5}$
Вода*	0,022	$1 \cdot 10^{-9}$
Сезонные ленточные глины в природных условиях	1,76–1,89	$(0,65–0,75) \cdot 10^{-6}$
Делювиальные, слегка влажные отложения в природных условиях	1,83	$7 \cdot 10^{-6}$
Сухой кварцевый песок	1,48–1,76	$(4,5–6,5) \cdot 10^{-6}$
Глинистый песок утрамбованный	1,13	$2,6 \cdot 10^{-6}$
Суглинки в природных условиях	0,69–1,19	$(1–3) \cdot 10^{-6}$
Суглинок (влажность 5,7 %, пористость 0,408)	1,13	$1,09 \cdot 10^{-6}$
Щебенистые элювиально-делювиальные отложения в природных условиях	1,46	$4,5 \cdot 10^{-6}$

* — объемный коэффициент диффузии D , m^2/c

Нормативные документы по обеспечению радоновой безопасности зданий

А. Документы, имеющие международный статус

1. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. IAEA Safety Standards for protecting people and the environment. Vienna, 2014. 471 p.
2. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности МАГАТЭ (пер. с англ.). — Вена, 2015. — 520 с.
3. Рекомендации 2007 года Международной комиссии по радиационной защите: Публикация 103 МКРЗ (пер. с англ.), 2009. — М. : Изд-во ООО ПКФ «Алана».
4. United Nations, Effects of Ionizing Radiation. Vol. I: Report to the General Assembly, Scientific Annexes A. and B; Vol. II: Scientific Annexes C, D and E, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UNSCEAR 2006 Report, E.08.IX.6 (2008) and E.09.IX.5 UN, New York, 2009.
5. United Nations, Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly), Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York, 2000.
6. Международная комиссия по радиологической защите: Риск возникновения рака легкого при облучении радоном и продуктами его распада. Заявление по радону, перевод Публикации 115 МКРЗ, 2013. — М. : Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России».
7. World Health Organization, WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective, WHO, Geneva, 2009. 94 p.
8. 2009 International Building Code / International Code Council. — Country Club Hills: ICC, 2009.
9. 2009 International Existing Building Code. — Country Club Hills: ICC, 2009.
10. 2009 International Residential Code for One- and Two-Family Dwellings. — Country Club Hills: ICC, 2009.
11. 2009 International Building Code / International Code Council. — Country Club Hills: ICC, 2009.

Б. Национальные стандарты и нормы

12. US Radon Mitigation Standards for Schools and Large Buildings (RMS-LB 2018). AARST Consortium on national radon standards. 69 p.

13. US Radon Mitigation Standards for Multifamily Buildings (RMS-MF 2018). AARST Consortium on national radon standards. 59 p.

14. US Soil Gas Mitigation Standards for Existing Homes (SGM-SF 2017). AARST Consortium on national radon standards. 80 p.

15. US Reducing Radon in New Construction of 1 and 2 Family Dwellings and Townhouses (CCAH 2020). AARST Consortium on national radon standards. 33 p.

16. US Protocol for Conducting Measurements of Radon and Radon Decay Products in Homes (MAH). ANSI/AARST standard. — 41 p.

17. The National Building Code of Finland-2010.

18. United Kingdom Building Regulations 2010.

19. Building Act 1984 / United Kingdom. — London: UK Statute Law Database, 2009.

20. Architects Act / New South Wales, Canada. — 2003.

21. Architects Act / Alberta Queen's Printer, Alberta, Canada. — 2009.

22. Architects Act — RSBC 1996 Chapter 17. British Columbia / Queens Printer, Victoria, British Columbia, Canada. — 2009.

23. Architects Act, 1996 Saskatchewan. Legislative Assembly of Saskatchewan, Canada. — 2008.

24. The Building Standard Law of Japan. — Tokyo: Building Center of Japan, 2009.

25. German Construction Contract Procedures (VOB 2006) : English Translations of German Standards // Übersetzung aller DIN-Normen der VOB, Teile A — C. — DIN, 2007.

26. National Building Code of Canada 2005 / Canadian Commission on Building and Fire Codes, National Research Council Canada. — 2005.

27. Нормы радиационной безопасности Украины НРБУ-97/Д-2000. Радиационная защита от источников потенциального облучения (ДГН 6.6.1. — 6.5.061–2000). — К. : Комитет по вопросам гигиенического регламентирования МЗ Украины — 43 с.

28. Нормы радиационной безопасности Беларуси НРБ-2000. Радиационная гигиена, радиационная безопасность (ГН 2.6.1.8–127–2000). — Мн. : Республиканский центр гигиены, эпидемиологии

и общественного здоровья Министерства здравоохранения Республики Беларусь. — 55 с.

29. Санитарные нормы и правила «Требования к радиационной безопасности» и Гигиенический норматив «Критерии оценки радиационного воздействия». Утверждено постановлением Министерства Здравоохранения Республики Беларусь от 28.12.2012 № 213 (с изменениями и дополнениями).

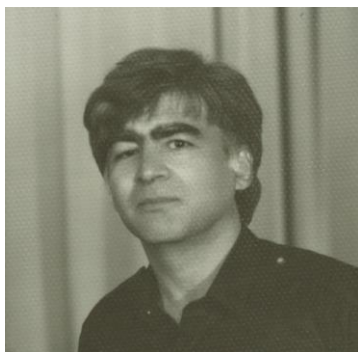
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Книга написана под редакцией:

Шубина Игоря Любимовича — члена-корреспондента Российской Академии архитектуры и строительных наук, доктора технических наук, заслуженного строителя РФ, лауреата премии правительства в области науки и техники, ведущего специалиста в области строительной физики в РФ, основоположника направления «Радионобезопасность в строительстве в РФ», директора НИИСФ РААСН.



Авторы монографии:



Гулабянц Лорен Арамович (1939–2017) — профессор, доктор технических наук, советник РААСН.

Автора настоящей монографии по праву можно отнести к известнейшим специалистам строительного дела Российской Федерации. После окончания в 1961 г. Строительного факультета Средне-Азиатского Политехнического института (г. Ташкент) он работал проектировщиком, а затем мастером на стройках в Узбекистане. В 1963 году поступил в аспирантуру НИИ строительной физики Госстроя СССР. С этого года он прошел замечательную школу НИИСФ от аспиранта до доктора технических наук. Он работал рука об руку с великими учеными строительной физики — Дроздовым В., Осиповым Г., Ушковым Ф., Умяковым П., Богословским В., Макриненко Л., Табунщиковым Ю., Борисовым Л. и др. В 1997 г. был удостоен звания профессора. Являлся одним из ведущих специалистов по широкому профилю вопросов строительной физики, как в СССР, так и в последствии — в Российской Федерации. Вместе с Шубиным И. был основателем в РФ нового направления в строительстве «Радионобезопасность», лаборатория «Радионобезопасность»

в строительстве» в НИИСФ РААСН, а также разработчиком первых норм по данному вопросу.

За время работы в НИИСФ РААСН Гулябянц Л. А. снискал высокий авторитет не только у сотрудников института, но и у специалистов строительной отрасли РФ и за рубежом. Им было опубликовано более 200 научных публикаций, Гулябянц Л. А. подготовил 11 кандидатов и 2 докторов технических наук. В 2003 г. правительством РФ Лорену Арамовичу Гулябянцу было присвоено звание «Заслуженный строитель Российской Федерации».



Калайдо Александр Витальевич — кандидат технических наук, доцент кафедры технологий производства и профессионального образования ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный университет имени Тараса Шевченко»

Калайдо А. В. по праву можно отнести к наиболее талантливым ученикам Гулябянца Л. А. В 2000 г. он окончил Восточнoукраинский Университет (г. Луганск) по специальности «Физика» и получил квалификацию инженера-физика. По окончании университета работал научным сотрудником Рубежанского филиала Восточнoукраинского национального университета им. В. Даля, после чего перешел в Луганский национальный университет имени Тараса Шевченко.

В 2016 г. поступил в аспирантуру НИИСФ РААСН, где его научным руководителем был Гулябянц Л. А. После того, как в 2017 г. Л. А. Гулябянц ушел из жизни, работу Александр Калайдо заканчивал под руководством профессора, д.т.н. Бакаевой Н. В. Кандидатская диссертация по теме «Модельное исследование процесса переноса радона в системе сред «грунт-атмосфера-здание» была успешно защищена в декабре 2017 г. Автор более 40 научных публикаций по вопросам радиационной безопасности объектов строительства.

**Лорен Арамович Гулабянц
Александр Витальевич Калайдо**

**Противорадоновая защита
жилых и общественных зданий**

Монография

Под редакцией
**члена-корреспондента РААСН, д.т.н.
И. Л. Шубина**

Верстальщик С. Лобанова

Издательство «Директ-Медиа»
117342, Москва, ул. Обручева, 34/63, стр. 1
Тел/факс + 7 (495) 334–72–11
E-mail: manager@directmedia.ru
www.biblioclub.ru
www.directmedia.ru



Издайте свою книгу у нас!

Издательство «Директ-Медиа» публикует учебники, монографии, литературу NON-FICTION, аудиокниги, новые издания и те, что с годами не утратили своей актуальности, коллективные научные сборники.

Наше издательство берет свои корни в книгоиздательских традициях и технологиях Германии. Мы – лидеры современного книгоиздательского процесса, охватывающего цифровые образовательные платформы для школ и вузов, издание электронных и печатных книг. Нашу продукцию отличает высокое полиграфическое качество и высокотехнологичный процесс продвижения книги.

Наши авторы – ведущие ученые и преподаватели страны. За 20 лет работы в России нами издано более 10 000 изданий учебной, академической и научно-популярной литературы.

Приобрести наши книги можно в интернет-магазине DIRECTMEDIA.RU и в ЭБС «Университетская библиотека онлайн» (BIBLIOTHECA.RU), в книжных и в интернет-магазинах страны.

***Хотите приобрести книгу издательства «Директ-Медиа»
или издать свое произведение?***

Мы ждем Вас!

www.directmedia.ru

Email: manager@directmedia.ru

Tel.: 8-800-333-6845 (звонок бесплатный)



