

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

*Кафедра компьютерной физики  
и метаматериалов на базе Саратовского филиала  
Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДОНА  
В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ (МАГИСТЕРСКОЙ) РАБОТЫ**  
студента 2 курса 256 группы  
направления 03.04.02 «Физика» физического факультета  
Ларина Андрея Николаевича

Заведующий кафедрой  
д. ф.-м. н., профессор

\_\_\_\_\_ В.М.Аникин

«07» 06.2020

Научный руководитель  
д. ф.-м. н., профессор

\_\_\_\_\_ В.М.Аникин

«07» 06.2020

Саратов  
2020

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуализация работы.** Радон как радиоактивный газ вносит самый большой вклад в среднюю дозу облучения населения из всех источников естественной радиации (космическое излучение, радиоактивные вещества земной коры) [1–14]. Согласно оценке Научного комитета ООН по действию атомной радиации (сокращенно НКДАР, английское наименование – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR), радон вместе со своими дочерними продуктами радиоактивного распада<sup>1</sup> ответствен примерно за  $\frac{3}{4}$  годовой индивидуальной эффективной эквивалентной дозы облучения, получаемой населением от земных источников радиации, и примерно за половину этой дозы от всех естественных источников радиации. Большую часть этой дозы человек получает от радионуклидов, попадающих в его организм вместе с вдыхаемым воздухом, особенно в непроветриваемых помещениях.

С точки зрения экологии человека радон нельзя рассматривать как типичный радиоактивный газ и относиться к нему как к обычному природному радионуклиду: радон находится и в нас, и вне нас, т.е. речь идёт об охране не столько окружающей, сколько внутренней среды человека. До 1980 года ни в одной стране мира не устанавливались нормативы на содержание радона в помещениях, и только в последние десятилетия были введены нормативы для существующих и проектируемых зданий, рекомендованные Международной комиссией по радиологической защите. В НАТО был даже создан специальный комитет по этой проблеме, а в США едва ли не в каждом доме теперь есть датчики уровня радона.

В нашей стране нормативы на содержание радона в воздухе жилых зданий были приняты в 1990 году. Создана Ассоциация обезвреживания радиоактивных отходов – спецкомбинаты "РАДОН"<sup>2</sup>. Помимо сугубо профессиональной аппаратуры для специалистов в области радиометрии появились и бытовые приборы - «индикаторы радона».

---

<sup>1</sup> При распаде радона образуются нелетучие радиоактивные продукты – изотопы полония, висмута и свинца, которые с большим трудом выводятся из организма.

<sup>2</sup> Под эгидой Саратовского спецкомбината находятся Саратовская, Пензенская, Белгородская, Липецкая, Курская, Орловская, Тамбовская области.

*Статистика радоновой эмиссии* существует и обновляется для различных районов Земли, но, насколько известно, теоретические модели процесса эмиссии радона, накопления радона и его дочерних продуктов в организме человека еще не построены. Как отмечено в [13], «до сих пор не существует надежной формализованной модели, описывающей процессы накопления радона, торона и их дочерних продуктов распада в атмосфере помещений с учетом всех путей поступления, параметров строительных материалов, покрытий и т.п.».

*Целью выпускной квалификационной работы (ВКР)* является решение одной из частей сформулированной в [13] глобальной проблемы – построение формализованной математической многокамерной модели контактов организма человека с радоном и накопления организмом радона как *сугубо стохастических (случайных) процессов*. Предлагаемая модель описывает *временную динамику поступления радона в организм человека и его накопление в организме*, при этом модель допускает вариацию уровней и интенсивности (во времени) радоновой эмиссии.

В трех главах ВКР рассмотрены следующие *задачи*:

рассмотрение в главе 1 ВКР радиационных свойств радона, источников радона в природных и техногенных средах;

анализ данных, которые могут быть положены в основу математической модели контактов организма человека с радоном и его изотопами;

построение математической модели контактов организма человека с радоном и его накопления в организме человека.

Таким образом, в выпускной квалификационной работе проводится систематизация данных о характере процесса контактов человека с радоном, об особенностях накопления радона в организме человека, данных о механизмах выведения радона, и предлагается математическая многокамерная модель [14–17] накопления в организме и выведения радона и продуктов его распада из организма.

## СТРУКТУРА И ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В целях замкнутости изложения и обоснования модели построение математической модели предваряется рассмотрением в главе 1 ВКР радиационных свойств радона, источников радона в природных и техногенных средах. Здесь же приводится краткий обзор как негативных последствий воздействия радона на организм человека (с приведением карты радонового риска для России, рис. 1), так и вопросов применения радона в медицине, здравоохранении, науке и технике, в частности в контексте прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного характера (землетрясений). Обращается также внимание на вопросы оптимизации строительства и эксплуатации радонозащищённых жилых помещений.



Рис. 1. Районирование России по потенциальной радоноопасности [12,13].

Опасные районы для населения ограничены сплошными замкнутыми линиями

В главе 2 ВКР анализируются данные, которые могут быть положены в основу математической модели контактов организма человека с радоном и его изотопами. Рассмотрены данные мониторинга радона и его изотопов, а

также продуктов их распада в окружающей среде, процессы выделения радона из почвы и строительных материалов, механизмы миграции радона в экосистемах.

Стохастический характер выделения радона в окружающую среду отражают рисунки 2 – 5. На рис. 2 отражены флуктуации концентрации радона в шахте на глубине 350 метров – в воздухе шахты и в скважинах, пробуренных в стенках шахты. Вариации концентрации радона наблюдались в течение 2,5 часов и фиксировались по числу распадов радона, сопровождавшихся альфа-излучением. Рис. 3 отражает эффект влияния взрыва, проведенного с целью снять напряжение в горной породе, и последующего затем через 30 мин горного удара на процесс поступления радона в шахту. Картина концентрации носит нестационарный случайный характер.

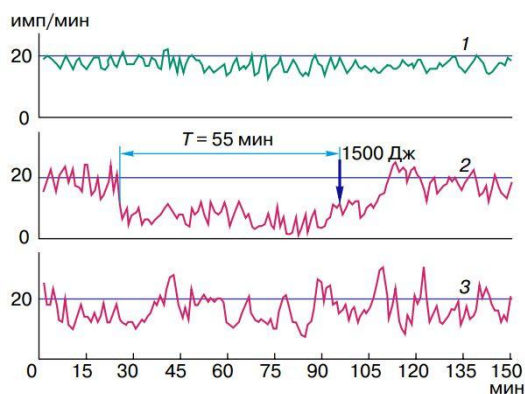


Рис. 2. График измерений концентрации радона на глубине 350 м: 1 – в воздухе шахты, 2, 3 – в наблюдательных скважинах, пробуренных в массиве известняка [13]

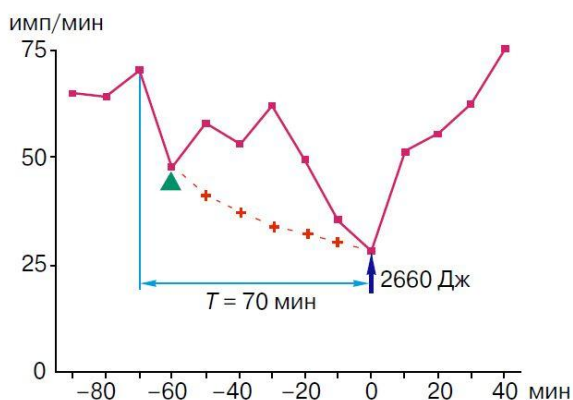


Рис. 3. График изменения концентрации радона в наблюдательной скважине вблизи эпицентра будущего горного удара. Треугольником отмечен момент взрывной отпалки руды, а стрелкой – момент горного удара (с указанием его энергии). Пунктирной линией отмечен прогнозируемый ход процесса при отсутствии промышленного взрыва [13]

Рис. 4 дает почасовую картину концентрации радона в доме, в который поступает вода, в которой содержится радон.

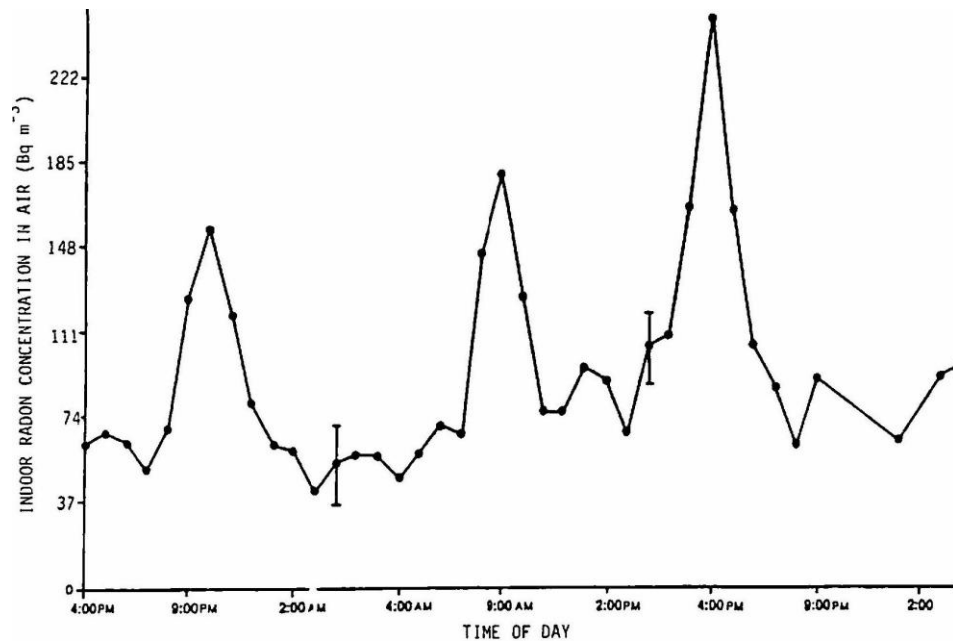


Рис. 4. Почасовое изменение концентрации радона в доме, в который поступает вода с концентрацией радона МБк/м<sup>3</sup> [1]

Флуктуационный характер уровня концентрации радона в типичном помещении в течение недели отражает рис. 5. График напоминает реализацию типичного винеровского процесса.

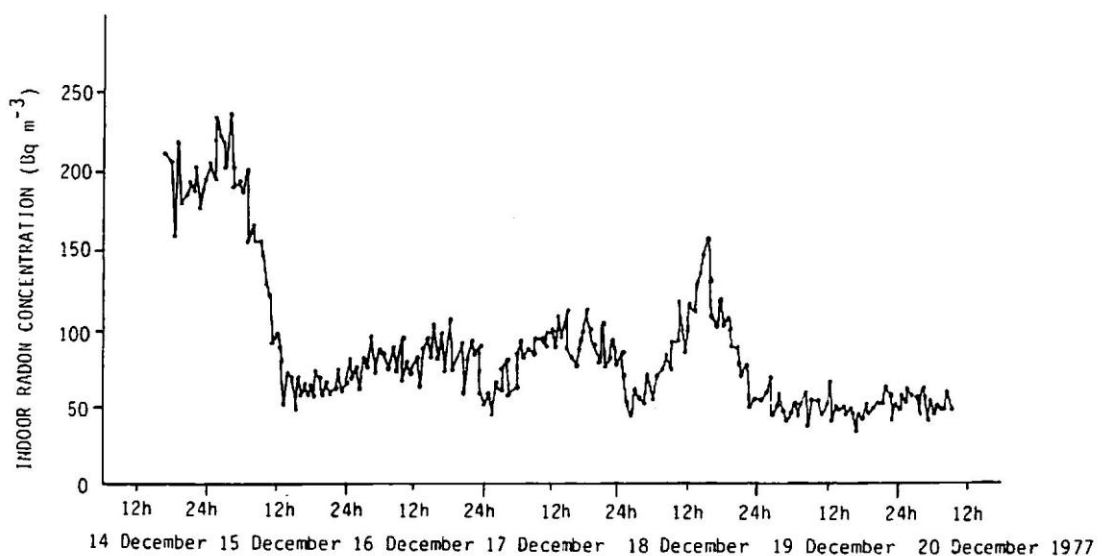


Рис. 5. Изменение концентрации радона в помещении в течение недели [1]

**В главе 3 ВКР** проводится построение математической модели контактов организма человека с радоном и его накопления в организме человека.

Вероятностное аналитическое решение задачи накопления чужеродных веществ в организме проведено в следующих направлениях. Предложено (на основе принятой в токсикологии многокамерной модели кинетики чужеродного агента в организме) стохастическое дифференциальное уравнение первого порядка для описания уровня содержания вредного вещества в организме человека, позволяющее рассматривать организм как линейную нестационарную апериодическую систему первого порядка по отношению к данному случайному воздействию.

В качестве основной характеристики процесса контактов организма с радоном и его продуктами распада примем уровень содержания чужеродного агента в организме, введя для обозначения переменную  $X(t)$ . Будем полагать, что изменение величины  $X(t)$  во времени носит случайный характер, что в общем случае может быть связано как с недетерминированным поведением процесса поступления радиоактивных продуктов в организм, так и со случайной вариацией параметров удержания вещества в организме (вывода их из организма).

Если представить человеческий организм некоторой системой, с которой соотносится характеристика  $X(t)$ , то дозы чужеродного агента, получаемые при контактах с ним, можно рассматривать как воздействие на входе системы  $\xi(t)$ , а характеристику  $X(t)$  – как случайный процесс на ее выходе. Для определения вероятностного поведения процесса  $X(t)$  необходима соответствующая информация и о вероятностных свойствах входного возмущения  $\xi(t)$ , и о свойствах преобразующей системы. Свойства рассматриваемой системы характеризуются особенностями выведения чужеродных веществ из организма. На основании развиваемого в биологии и токсикологии камерного анализа [15, 16] процесс выведения определяется совокупным действием независимых механизмов (пусть их число предполагается равным  $m$ ). Такие механизмы связывались с деятельностью легких, кожи, ЖКТ и почек.

В камерной (компарментальной, частевой) модели организм представлен как совокупность взаимосвязанных абстрактных частей (камер), между которыми и внутри которых происходят процессы распределения, мета-

близма и выведения вещества. При условии, что скорости этих процессов пропорциональны концентрации (или количеству) вещества в той части, где этот процесс происходит, изменение концентрации  $i$ -го вещества  $C_i$  определяется уравнением:

$$C_i(t) = \sum_{k=1}^m A_{ik} \exp(-\alpha_k t),$$

где  $n$  – число камер модели,  $A_{ik}$  – предэкспоненциальные множители,  $\alpha_k$  – константа скорости выведения,  $t$  – время.

Для одного вещества, таким образом, модель транспорта чужеродных агентов (уменьшение во времени количества накопленного вещества) в организме аппроксимируется (для каждого канала) экспоненциальным законом, характеризуемым двумя параметрами – показателем экспоненты  $\alpha_i$  и предэкспоненциальным множителем  $p_i$  ( $\sum p_i = 1$ ), то есть в промежутках между контактами с чужеродным агентом количество содержащегося в организме вещества описывается следующей закономерностью:

$$Q(t) = \sum_{i=1}^m p_i e^{-\alpha_i t} \quad (1)$$

(без учета слагаемого, определяемого начальными условиями процесса). В своем рассмотрении будем полагать величины  $\alpha_i$  и  $p_i$  известными (из биолого-медицинских исследований), не придавая им статистической природы, то есть не предполагая их возможную варьированность от системы и параметрическую зависимость от времени. В формализованной модели использована нормировка предэкспоненциальных множителей.

Закономерность (1) позволяет предложить для описания изучаемого процесса  $X(t)$  стохастическое дифференциальное уравнение первого порядка,

$$\frac{d}{dt} X(t) + c(t)X(t) = \xi(t), \quad (2)$$

определяющее одномерную (с одним входом и одним выходом) нестационарную линейную аperiodическую систему первого порядка. Задание переменного параметра – функции  $c(t)$  – подчинено условию (1):

Найдена импульсная переходная функция этой системы, допускающая в асимптотическом рассмотрении (при наличии стационарности процесса по-



ступления пестицидов в организм) наличие установившегося режима содержания пестицидов.

Определены законы распределения и статистические моменты для случайных функций, аппроксимирующих процесс инъекции.

Приведены интегральные преобразования, связывающие статистические характеристики уровня накопления чужеродного агента в организме со статистическими характеристиками входного процесса. Определены математическое ожидание, дисперсия, автокорреляционная функция накопленной дозы вещества как в "переходном" (на начальном этапе контактов), так и в установившемся "стационарном" режимах. Проведено также решение интегро-дифференциального уравнения Колмогорова – Феллера относительно плотностей вероятности (одномерной и переходной) для рассматриваемого одномерного дискретно-непрерывного процесса.

Найдены отношения, позволяющие для различных значений параметров механизмов выведения чужеродных веществ и при различной степени интенсивности контактов и получаемой дозы оценить средний уровень накопления чужеродных агентов, соотнести его с допустимыми уровнями, оценить динамику вхождения организма в "стационарный" режим и разброс в уровнях накопления.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ**

Результаты настоящей работы могут рассматриваться как достаточно удачный пример применения математического арсенала марковских процессов к одной из проблем современной экологии – радоновой проблемы в контексте моделирования процесса кумуляции вредных агентов организмом человека.

В дипломной работе проведена систематизация данных:

о характере процесса контактов человека с радоном (обращено внимание на возможность моделирования контактов в рамках случайного процесса),

об особенностях накопления радона в организме человека с выявление кумулятивной роли отдельных органов;

о механизмах выведения радона с выявлением приоритетности механизмов (органы дыхания, кожа, ЖКТ, почки).

На этой достоверной эмпирической базе предложено (в рамках многокамерного токсикологического анализа) решение задачи построение математической многокамерной модели накопления в организме и выведения радона и продуктов его распада из организма.

Найдены отношения, позволяющие для различных значений параметров механизмов выведения чужеродных веществ из организма человека и при различной степени интенсивности контактов и получаемой дозы оценить средний уровень накопления чужеродных агентов, соотнести его с допустимыми уровнями, оценить динамику вхождения организма в "стационарный" режим и разброс в уровнях накопления.

На основе построенной математической модели возможен прогноз радонового риска как для профессионалов (работников урановых шахт, горнообогатительных заводов, сотрудников некоторых специальных предприятий ядерной индустрии, операторов радиоизотопных хранилищ, врачей-радиологов и т.п.), так и для населения, проживающего в зоне влияния радоноопасных объектов, людей, обитающих (и работающих) в сельских домах и/или городских квартирах, больных, принимающих интенсивную радонотерапию, а также отдыхающих на радоновых курортах.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Доклад НКДАР 1988. Источники, эффекты и риски ионизирующего излучения. UNSCEAR 1988 Report: "*Sources, effects and risks of ionizing radiation*". Sections 83–169. Radon. Pp. 62 – 81.

<http://www.unscear.org/unscear/en/publications/1988.html>

2. Доклад НКДАР 1993. Источники и эффекты ионизирующего излучения. UNSCEAR 1988 Report: "*Sources, effects and risks of ionizing radiation*". Sections 74–136. Radon. P. 45-54.

<http://www.unscear.org/unscear/en/publications/1993.html>

[http://www.unscear.org/docs/reports/1993/1993b\\_pages%2031-89.pdf](http://www.unscear.org/docs/reports/1993/1993b_pages%2031-89.pdf)

3. Доклад НКДАР 2000. Источники и эффекты ионизирующего излучения. UNSCEAR 2000 Report: "*Sources and effects of ionizing radiation*" in 2 volumes. V. 1. Sections 88–159. P. 96–108.

[http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000\\_1.html](http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000_1.html)

4. Доклад НКДАР 2008. Источники и эффекты ионизирующего излучения. В 2-х т. UNSCEAR 2008 Report: "*Sources and effects of ionizing radiation*" in 2 volumes. V. 2. Sections 493–503, 510. Radon exposure in workplaces other than mines. P. 288–290.

[http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008\\_2.html](http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008_2.html)

5. Доклад НКДАР 2012. Источники и эффекты ионизирующего излучения. UNSCEAR 2012 Report: "*Sources, effects and risks of ionizing radiation*".

<http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2012.html>

6. Доклад НКДАР 2013. Источники и эффекты ионизирующего излучения. UNSCEAR 2013 Report: "*Sources, effects and risks of ionizing radiation*" Vol. 1.2.

[http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2013\\_1.html](http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2013_1.html)

[http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2013\\_2.html](http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2013_2.html)

7. Доклад НКДАР 2016. Источники и эффекты ионизирующего излучения. UNSCEAR 2016 Report: "*Sources, effects and risks of ionizing radiation*". <http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2016.html>

8. Доклад НКДАР 2017. Источники и эффекты ионизирующего излучения. UNSCEAR 2017 Report: "*Sources, effects and risks of ionizing radiation*". United Nations, March 2018. <http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2017.html>

9. Радиация. Дозы, эффекты, риск. М. : Мир,1990. 79 с. (Обзор доклада НКДАР 1988 г.).

10. Лекомте Ж.-Ф., Соломон С., Такала Дж., Юнг Т., Странд П., Мюрит К., Киселев С., Жуо В., Шеннон Ф., Янсенс А. Радиологическая защита от облучения радо-

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

11. Маренный А.М., Киселев С.М.. Национальные радоновые программы: опыт реализации и задачи на перспективу // Радиационная гигиена Том 12 № 2 (спецвыпуск), 2019. С. 97 – 108.

12. Уткин В.И. Газовое дыхание земли // Соросовский образовательный журнал. 1997. Т.3. № 1. С. 57-64.

13. Уткин В.И. Радоновая проблема в экологии // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6. № 3. С. 73-80. [http://www.pereplet.ru/nauka/Soros/pdf/0003\\_073.pdf](http://www.pereplet.ru/nauka/Soros/pdf/0003_073.pdf)

14. Бекман И.Н. Радиохимия: Курс лекций. М: Изд-во Московского ун-та, 2006. 568 с. Лекция 10. Химия радиоактивных элементов: астат, радон и франций. <http://profbeckman.narod.ru/RHO.htm>

15. Соловьев В.Н., Фирсов А. А., Филов В. А. Фармакокинетика. М.: Медицина, 1980. 424 с.

16. Холодов Л. Е., Яковлев В. П. Клиническая фармакокинетика. М.: Медицина, 1985. 444с.

17. Голубенцев А.Ф., Аникин В.М. Математические модели кумуляции чужеродных веществ в организме. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2002. 36 с.

18. Финкельштейн Д. Н., Инертные газы, 2 изд., М. : 1979.

19. Несмеянов Ан. Н., Радиохимия, М. : 1978

20. Шуколюков Ю. А., Левский Л. К. Геохимия и космохимия изотопов благородных газов, М., 1972;

21. Minkin L. Is diffusion, thermodiffusion, or advection a primary mechanism of indoor radon entry? // Radiation Protection Dosimetry. 2002. 102 (2). P. 153-162.

22. Minkin L. Thermal diffusion of radon in porous media // Radiation Protection Dosimetry. 2003. 106 (3) P. 267-272.

23. Цапалов А.А. Метод определения коэффициента диффузии радона в материалах ограждающих конструкций зданий: Автореферат дис. ... канд. тех. наук. по спец. 05.23.03 –теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение. М: 2009. <http://dis.podelise.ru/text/index-47855.html>