

На правах рукописи



**Климшин Алексей Валерьевич**

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЕРЕНОСА РАДОНА В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ  
СЛОЕ ГРУНТОВ И В ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ**

25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поиска полезных ископаемых»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук (ИГФ УрО РАН)

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор  
член-корреспондент РАН

Уткин Владимир Иванович

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор

Жуковский Михаил Владимирович

доктор технических наук

Чеботина Маргарита Яковлевна

**Ведущая организация:**

Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России  
Б.Н.Ельцина

Защита состоится «10» мая 2012 г. в 14-00 часов на заседании  
Диссертационного Совета Д004.009.01 ИГФ УрО РАН по адресу 620016,  
г.Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 100

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГФ УрО РАН

Автореферат разослан «6» апреля 2012г.

Ученый секретарь диссертационного Совета  
доктор физико-математических наук, профессор

Ю.В.Хачай

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Измерения объемной активности радона в почвенном воздухе (ОАР) и плотности потока радона с поверхности грунтов (ППР) проводятся для решения различных геофизических и геоэкологических задач: поиск месторождений урана, геологическое картирование территорий, оценка радоноопасности участков застройки, прогнозирование землетрясений. Одной из главных методических проблем, возникающих при анализе результатов измерений, является выделение полезного для решаемой задачи сигнала и оценка ошибок, вызванных протеканием в геологической среде процессов, влияющих на распределение радона в приповерхностном слое грунтов. Один из таких процессов – промерзание верхнего слоя грунтов. В работе также рассматривается влияние свободной тепловой конвекции воздуха в верхнем слое почвы на перенос радона. Учет этих явлений при интерпретации результатов измерений ОАР и ППР требует наличия соответствующих математических моделей, описывающих перенос радона в приповерхностном слое грунтов. Вопросы, связанные с переносом радона в подземных горных выработках, возникают при обеспечении радиационной безопасности в шахтах и подземных тоннелях. На сегодняшний день является актуальной проблема построения математической модели накопления радона в подземном помещении, учитывающей геофизические свойства грунтов, размеры помещения и кратность воздухообмена. Необходимость разработки таких моделей, проведения соответствующих экспериментальных исследований и составления методических рекомендаций по интерпретации результатов измерений объемной активности и плотности потока радона обуславливает актуальность данных исследований.

Среди основных работ, посвященных затронутым вопросам, можно упомянуть публикации Булашевца Ю.П., Граммакова А.Г., Хайковича И.М., Уткина В.И., Баранова В.И., Салтыкова Л.Д., Шалаева И.Л., Лебедева Ю.А., Павлова И.В., Камнева Е.Н., Юркова А.К., Козловой И.А., Микляева Т.С., Петровой Т.Б., Гулабянца Л.А., Беликова В.Т., Паровика Р.И., Роголиса В.С., Кузнецова Ю.В., Ярыны В.П., Clarkin M., King C.Y., Robinson A.L., Neznal M. и других авторов.

Целью настоящей диссертационной работы является изучение особенностей переноса радона в приповерхностном слое грунтов и в подземных горных выработках.

### Задачи исследования:

1. Провести библиографическое исследование по теме работы.
2. Обосновать методику мониторинга радона и температуры грунтов в естественных условиях.
3. Провести мониторинг объемной активности радона и температуры грунтов в условиях их промерзания.
4. Разработать математическую модель переноса радона в грунтах в условиях их промерзания.
5. Разработать и создать лабораторный стенд для моделирования процесса свободной тепловой конвекции воздуха в пористой среде, генерирующей радон.
6. На лабораторном стенде провести экспериментальные исследования плотности потока радона при различных градиентах температуры пористой среды.
7. Разработать модель переноса радона в приповерхностном слое грунтов в условиях свободной тепловой конвекции почвенного воздуха.

8. Разработать модель поступления и накопления радона в подземных горных выработках.

9. Рассчитать ожидаемые уровни радона в воздухе проектируемых станций второй линии метрополитена в г. Екатеринбурге.

Защищаемые научные положения:

1. Разработана математическая модель, описывающая изменение объемной активности и плотности потока радона в условиях промерзания грунтов. Рассчитаны кратности изменения этих величин в зависимости от глубины промерзания и от диффузионных характеристик грунтов.

2. По результатам экспериментальных исследований и математического моделирования установлено, что суточные и годовые колебания температуры поверхности грунтов могут приводить к возникновению свободной тепловой конвекции почвенного воздуха, вызывающей значительные пространственно-временные неоднородности распределения плотности потока радона.

3. Разработана математическая модель поступления и накопления радона в подземных горных выработках, учитывающая их размеры, кратность воздухообмена и свойства грунтов (удельная активность радия-226, пористость, плотность, коэффициенты эманирования и диффузии радона).

Научная новизна:

1. Разработана новая модель переноса радона в верхнем слое грунтов в условиях их промерзания, в которой коэффициент диффузии радона изменяется во времени и по глубине.

2. Впервые получены экспериментальные данные описывающие изменение объемной активности радона и температуры грунтов в условиях промерзания.

3. На основании построения и использования новой модели переноса радона в приповерхностном слое грунтов в условиях их промерзания, были рассчитаны кратности уменьшения плотности потока радона и увеличения объемной активности радона. Предложены методические рекомендации по обработке результатов измерений, выполненных в условиях промерзания грунтов.

4. Впервые численно решена задача о переносе радона в пористой среде в условиях свободной тепловой конвекции.

5. На лабораторном стенде впервые получены экспериментальные данные, которые подтверждают, что возникновение свободной тепловой конвекции почвенного воздуха в грунтах приводит к трехкратному увеличению стандартного отклонения плотности потока радона с поверхности грунтов.

6. Разработана новая модель переноса радона в подземных горных выработках, учитывающая размеры помещений, кратность воздухообмена и свойства грунтов (удельная активность радия-226, пористость, плотность, коэффициенты эманирования и диффузии радона).

7. С использованием новой математической модели впервые рассчитаны ожидаемые уровни ЭРОА радона в воздухе будущих помещений второй линии метрополитена в г. Екатеринбурге.

Практическая значимость работы:

1. Рассчитанные кратности изменения плотности потока и объемной активности радона необходимо использовать при интерпретации измерений этих величин, выполненных в зимнее время года.

2. Условия возникновения свободной тепловой конвекции почвенного воздуха в верхнем слое грунтов необходимо учитывать при выборе времени и места измерений плотности потока радона.

3. Разработанная модель поступления и накопления радона в горных выработках применима для оценки уровня радона в процессе строительства и эксплуатации шахт и подземных тоннелей и была использована для оценки потенциальной радоноопасности участка под строительство второй линии метрополитена в г.Екатеринбурге.

#### Апробация работы:

Исследования выполнялись в ИГФ УрО РАН в рамках темы НИР «Геодинамические исследования на Урале методами GPS-наблюдений и радонового мониторинга» (номер гос. регистрации 01.2.00901715), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы» (ГК №П1271), Программы №16 Президиума РАН и программы №6 ОНЗ РАН. Основные результаты проведенных исследований докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и семинарах: Научно-практический семинар «Радон в геологоразведке и экологии» (Москва, 2007); IX Уральская молодежная научная школа (Екатеринбург, 2008); X Уральская молодежная научная школа (Пермь, 2009); Пятые научные чтения памяти Ю.П.Булашевича (Екатеринбург, 2009); XI Уральская молодежная научная школа (Екатеринбург, 2010); XII Уральская молодежная научная школа (Пермь, 2011); Шестые научные чтения памяти Ю.П.Булашевича (Екатеринбург, 2011); Осеннее собрание Американского геофизического союза AGU Fall Meeting 2011 (Сан Франциско, 2011), на Ученом совете ИГФ УрО РАН.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 19 научных работ, в том числе 8 статей в научных журналах (из них 3 в изданиях, рекомендованных ВАК) и сборниках и 11 тезисов докладов.

Личный вклад автора. Постановка задач проведена совместно с научным руководителем. Экспериментальные и теоретические исследования, описанные во второй и третьей главах, выполнены совместно с соавторами опубликованных работ. Исследования, описанные в четвертой главе, проведены автором лично.

Благодарности. Автор благодарит за ценные рекомендации при подготовке работы научного руководителя чл.-корр. РАН Уткина В.И., а также д.ф.-м.н. Беликова В.Т., д.г.-м.н. Демежко Д.Ю., д.ф.-м.н. Хачай Ю.В., д.т.н. Бахтерева В.В. к.т.н. Рыбакова Е.Н., к.ф.-м.н. Миндубаева М.Г., к.г.-м.н. Юркова А.К., Рывкина Д.Г.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов и библиографического списка, изложенных на 99 страницах машинописного текста, содержит 15 рисунков, 67 формул, 5 таблиц и список цитированной литературы (107 источников, из них 76 на русском и 31 на иностранных языках).

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приводится обзор современного состояния исследований переноса радона в приповерхностном слое грунтов и подземных горных выработках.

Во второй главе описаны экспериментальные исследования и предложена новая математическая модель переноса радона в условиях промерзания поверхности грунтов, которая хорошо согласуется с результатами эксперимента. В результате исследований предложены методические рекомендации, позволяющие учесть влияние промерзания грунтов на значения плотности потока и объемной активности радона.

В основе модели лежит предположение об уменьшении коэффициента диффузии радона в промерзающем слое грунтов. Автор предполагает, что мерзлый слой грунтов остается проницаемым для радона, но обладает некоторой экранирующей способностью. По мере промерзания грунтов мощность мерзлого слоя увеличивается. Это приводит к увеличению его экранирующей способности.

Для описания переноса радона в грунтах используется уравнение диффузии эманации в пористой среде [Булашевич Ю. П., Хайритдинов Р. К., 1959]:

$$\eta \frac{\partial C(z,t)}{\partial t} = Q - \lambda \eta C(z,t) + \frac{\partial}{\partial z} (D(z,t) \frac{\partial C(z,t)}{\partial z}), \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями:

$$C(z,0) = \frac{Q}{\lambda \cdot \eta} \cdot (1 - e^{-\frac{z}{l_1}}), \quad C(0,t) = 0, \quad C(\infty,t) = \frac{Q}{\eta \cdot \lambda}, \quad (2)$$

где  $C(z,t)$  – объемная активность радона в почвенном воздухе (Бк/м<sup>3</sup>);  $\eta$  – пористость;  $Q$  – скорость выделения радона в поры в единице объема среды (Бк/(м<sup>3</sup>·с));  $\lambda$  – постоянная распада радона, равная  $2.1 \cdot 10^{-6}$  (1/с);  $D(z,t)$  – коэффициент диффузии (м<sup>2</sup>/с),

$l_1 = \sqrt{\frac{D_1}{\eta \cdot \lambda}}$  – диффузионная длина радона в грунтовом воздухе (до промерзания).  $D_1$  – коэффициент диффузии радона до промерзания (м<sup>2</sup>/с). Решение ищется в полубесконечной области, ограниченной сверху поверхностью почвы.

Зависимость коэффициента диффузии от времени и глубины (рис. 1) задана в виде [Климшин А.В. и др., 2010]:

$$D(z,t) = D_1 - (D_2 - D_1) \cdot \chi(z - h(t)), \quad (3)$$

где  $\chi(z)$  – функция Хевисайда (единичная ступенчатая функция),  $h(t)$  – глубина промерзания грунтов (м).  $D_2$  – коэффициент диффузии радона в грунтах после их промерзания (м<sup>2</sup>/с).

Функция  $h(t)$  аппроксимирована соотношением:

$$h(t) = \frac{h_{\max} \cdot t}{T} (\chi(t) - \chi(t - T)) + h_{\max} \cdot \chi(t - T). \quad (4)$$

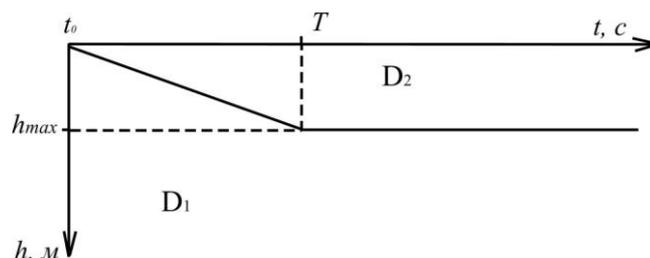


Рис. 1. Зависимость глубины промерзания грунтов от времени [Климшин А.В. и др., 2010]

В выражениях (3) и (4) начальный момент времени –  $t=t_0$  соответствует началу процесса промерзания, а  $t=T$  – время установления максимальной глубины промерзания  $h(T)=h_{max}$ .

Выражения (1-4) представляют собой математическую модель переноса радона в условиях промерзания грунтов. При  $t \gg T$  задача (1-4) имеет стационарное аналитическое решение:

$$C(\alpha) = \begin{cases} \frac{Q}{\lambda \cdot \eta} \cdot \left( 1 - e^\alpha + \frac{sh\alpha \cdot e^\beta \cdot (1 + \gamma)}{ch\beta + \gamma \cdot sh\beta} \right), & z \leq h_{max} \\ \frac{Q}{\lambda \cdot \eta} \cdot \left( 1 + \frac{e^{\beta(1+\gamma) \cdot (z-\gamma)}}{1 + \gamma \cdot th\beta} \right), & z \geq h_{max} \end{cases}, \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{z}{l_1}, \quad \beta = \frac{h_{max}}{l_1}, \quad \gamma = \frac{l_2}{l_1},$$

где  $l_2$  - диффузионная длина радона в мерзлом слое грунта.

Экспериментальные исследования переноса радона в условиях промерзания верхнего слоя грунтов проводились с 1 октября 2009 г по 30 января 2010 г на специально подготовленном полигоне, который расположен на территории Института геофизики УрО РАН, в г. Екатеринбурге. Температура грунтов измерялась с помощью автономного цифрового измерителя температуры разработанного в ИНГГ СО РАН. Точность регистрации температуры обеспечена на уровне 0.02 °С. Измерения проводились на поверхности грунтов и на глубинах 1 см, 21 см, 31 см, 51 см, 1 м, 2 м, 3 м с периодом 10 минут. На рисунке 2 приведены результаты среднесуточных температур грунтов за весь период наблюдений.

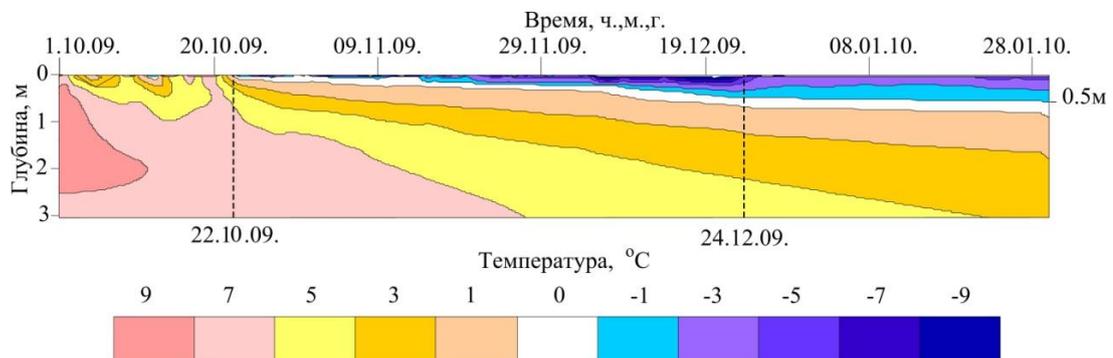


Рис. 2. Зависимость температуры грунтов от глубины и времени [Климшин А.В. и др., 2010]

Мониторинг объемной активности радона в почвенном воздухе на глубинах 0,7 и 2,7 м проводился с помощью радиометра радона AlphaGuard PQ 2000 PRO. Результаты измерений объемной активности радона изображены точками на рисунке 4.

Значения максимальной глубины промерзания  $h_{max}=0.5$  м найдено по результатам измерения температуры грунтов (рисунок 3). Интервал времени установления этого значения  $T^*=T-t_0=11.6 \cdot \lambda^{-1}c$  (интервал времени выражен через постоянную распада радона  $\lambda$  для удобства записи) обозначен пунктирными линиями на рисунке 4.

На рисунке 3 приведены решения задачи (1-4), полученные методом конечных разностей. При  $t > T$  численное и аналитическое (5) решения совпадают. Значения

параметров  $Q$ ,  $D_1$ ,  $D_2$ , входящих в выражения (1-4), подобраны на основе сравнения экспериментальных значений объемной активности радона в грунтовом воздухе с теоретическими.

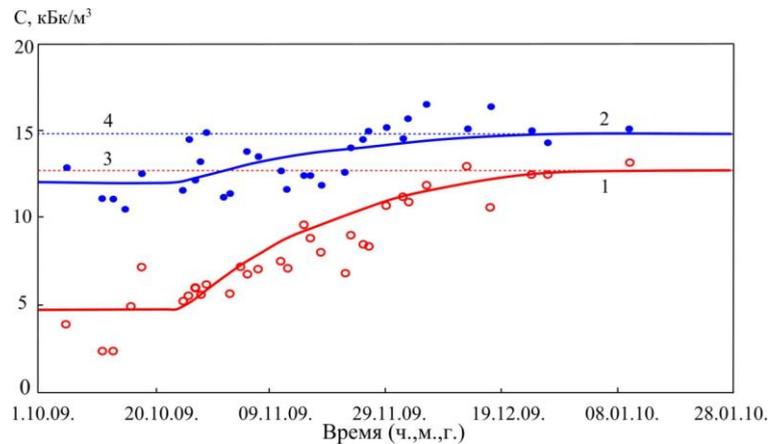


Рис. 3. Изменение объемной активности радона ( $C$ ) за период измерений на глубине 0.7 (кривая 1, светлые кружки) и 2.7 м (кривая 2, темные кружки). Кривые линии – теоретический расчет; кружки – экспериментальные значения; пунктирные линии – стационарное аналитическое решение (3 – для глубины 0,7 м; 4 – для глубины 2,7 м) [Климшин А.В. и др., 2010]

Процедура подбора основана на минимизации функционала, являющегося суммой квадратов невязок между экспериментальными и теоретическими значениями. Используя найденные значения этих параметров, были рассчитаны теоретические кривые изменения объемной активности радона в грунтах с глубиной для различных моментов времени (рисунок 5, слева). Значения плотности диффузионного потока радона с поверхности грунтов, представленные на рисунок 4 (справа), рассчитаны по формуле:

$$j(t) = D(0,t) \cdot \left[ \frac{\partial C(z,t)}{\partial z} \right]_{z=0} . \quad (6)$$

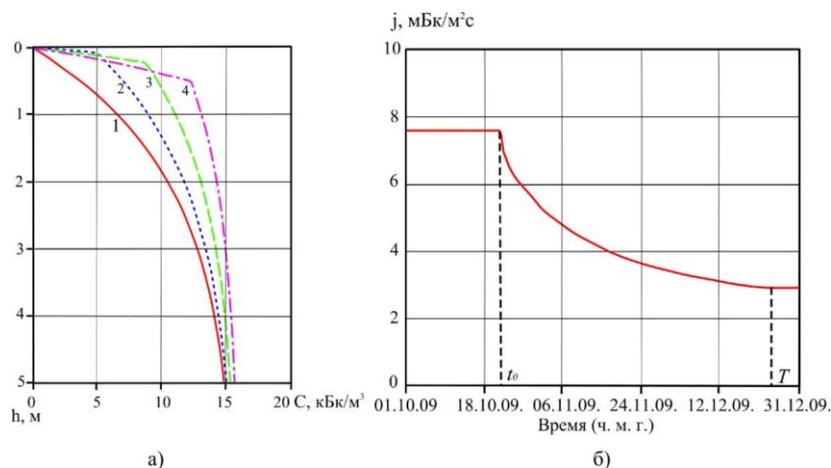


Рис. 4. а) - Теоретический расчет кривых изменений объемной активности радона  $C$  при различных глубинах промерзания, соответствующих временам измерений: 1 – 22.10.09; 2 – 1.11.09; 3 – 17.11.09; 4 – 21.12.09; б) Теоретический расчет изменения плотности потока радона  $j$  с поверхности грунтов за период, соответствующий времени измерений [Климшин А.В. и др., 2010]

Отношение значений ОАР на глубине 0,7 м после установления мерзлого слоя ( $t \geq T$ ), к значениям этой величины, определенным в период, предшествующий промерзанию ( $t \leq t_0$ ), определено в работе как кратность увеличения объемной активности радона:

$$K_c = \frac{C(0,7,T)}{C(0,7,t)} \quad (7)$$

Кратность уменьшения ППР с поверхности грунтов введена выражением:

$$K_j = \frac{j(0)}{j(T)} \quad (8)$$

В работе приведен расчет величин  $K_c$  и  $K_j$  в зависимости от диффузионной длины радона в грунтах до промерзания и глубины промерзания (рис. 5) в предположении, что значение коэффициента диффузии радона в мерзлом слое равно ( $D_2 \approx 9.1 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ ), найденному в эксперименте. Максимальные значения кратностей изменения объемной активности и плотности потока радона, при значениях диффузионной длины и глубины промерзания, приведенных на рисунке 6, равны  $K_c=2.87$  и  $K_j=3.21$ , соответственно. Средние значения этих величин равны  $K_c=1.72$  и  $K_j=1.80$ .

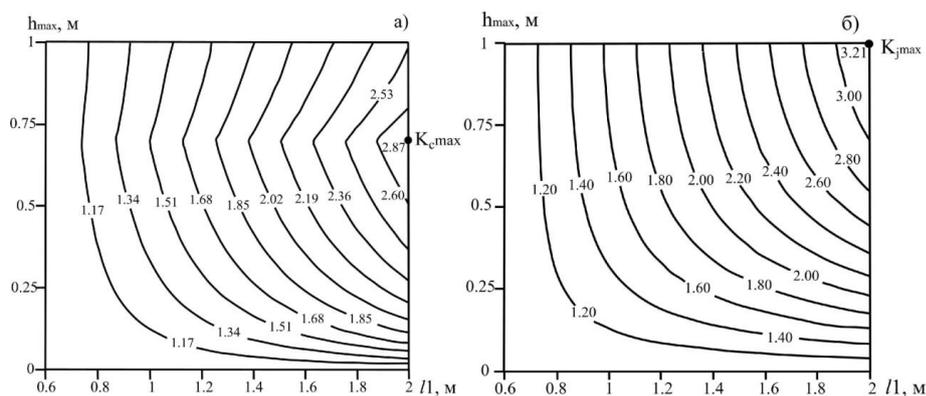


Рис. 5 Теоретический расчет кратностей изменения (шифр кривых) объемной активности радона на глубине 0.7 м (а) и плотности потока радона с поверхности грунтов (б) при их промерзании в зависимости от диффузионной длины радона в грунтах и глубины промерзания [Климшин А.В. и др., 2010]

В результате проведенных исследований дана оценка влияния промерзания поверхностного слоя грунтов на значения объемной активности и плотности потока радона с поверхности почвы. Сезонные вариации этих величин необходимо учитывать при оценке потенциальной радоноопасности строительных площадок. На рис. 5 приведены результаты расчета поправок, позволяющих компенсировать влияние промерзания на значения ОАР и ППР в зависимости от глубины промерзания и от диффузионных свойств грунтов. Если глубина промерзания и диффузионные свойства грунтов неизвестны, то можно использовать следующие усредненные значения поправок. В результате промерзания ОАР возрастает в среднем в 1,7 раз, а ППР уменьшается в среднем в 1,8 раз.

В третьей главе исследуется влияние свободной тепловой конвекции почвенного воздуха на перенос радона в приповерхностном слое грунтов. На примере экспериментальных данных и численных расчетов показано, что при положительных градиентах температуры, соответствующих градиентам, возникающим при охлаждении поверхности почвы в естественных условиях, возникает свободная тепловая конвекция, которая приводит к неоднородному распределению плотности потока радона по поверхности грунта [Климшин А.В., 2009, Климшин А.В., Миндубаев М.Г., Колотухин А.Э., 2011].

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях для того, чтобы исключить или ограничить влияние на плотность потока радона колебаний атмосферного давления, скорости и направления ветра, изменения влажности пористой среды, а также влияние осадков и фазовых переходов флюида. Экспериментальный стенд изображен на рис. 6. Создаваемый в лабораторной установке градиент температуры составляет приблизительно 20-30 °С/м, что соответствует градиенту, возникающему в естественных условиях при суточных колебаниях температуры грунтов.

Верхняя часть экспериментального стенда представляет собой емкость, заполненную доверху смесью из гранитного щебня фракции 5 мм и гранитного отсева фракции 1 мм. Проницаемость этого материала, определенная методом фильтрации, составляет  $K=2 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ . Боковые стенки корпуса обклеены изнутри теплоизолирующим материалом (поролон) для уменьшения горизонтального теплового потока. В нижней части стенда размещен нагревательный элемент, позволяющий поддерживать положительный градиент температуры в пористой среде. Для измерения градиента температуры в толще пористой среды размещены температурные датчики на расстоянии 30 и 450 мм от дна стенда.

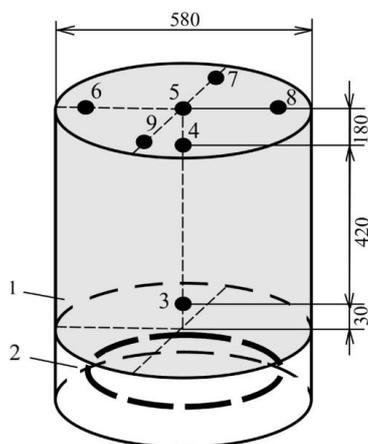


Рис. 6. Общий вид экспериментального стенда: 1 – часть стенда, заполненная щебнем и отсевом, 2 – нагревательный элемент, 3,4 – температурные датчики, 5-9 точки измерений плотности потока радона (точки 6-9 удалены на 220 мм от точки 5) [Климшин А.В., Миндубаев М.Г., Колотухин А.Э., 2011]

Температура пористой среды измерялась терморегистратором Center 306. Измерения плотности потока радона производились в течение 2 часов методом экспонирования в контрольных точках накопительных камер с сорбентом радона, с последующим определением величины потока на измерительном комплексе “Камера-01” по величине

бета-излучения дочерних продуктов распада радона, поглощенного сорбентом. Экспериментальные данные измерения температуры в пористой среде сопоставлялись с теоретическими расчётами. Для этого решалась задача распространения тепла в однородной среде:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa_{ef} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (9)$$

$$T(z,0) = T_1, \quad T(0,t) = T_2, \quad T(h,t) = T_1,$$

где  $T$  – температура среды ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_1$  – температура помещения, в котором находится стенд ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_2$  – температура нагревателя ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $h$  – высота стального цилиндра (м),  $\kappa_{ef}$  – коэффициент температуропроводности среды ( $\text{м}^2/\text{с}$ ). Ось  $OZ$  направлена вверх. Ее начало совпадает с дном стального цилиндра. Аналитическое решение задачи (3.9) имеет вид:

$$T(z,t) = T_1 - (T_2 - T_1) \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{2h(n+1) - z}{2\sqrt{\kappa_{ef}t}} \right) - \operatorname{erfc} \left( \frac{z + 2nh}{2\sqrt{\kappa_{ef}t}} \right) \right]. \quad (10)$$

На рисунке 3.6 представлены результаты измерений температуры пористой среды при ее подогреве снизу. Время включения подогрева стенда соответствует отметке  $t = 2,4$  ч.

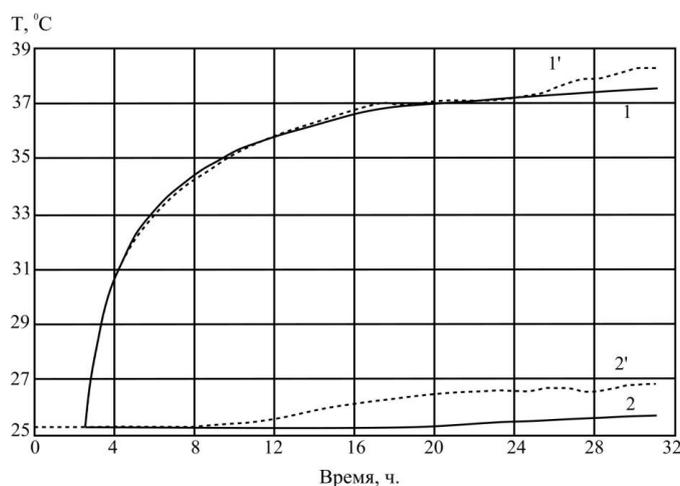


Рис. 7. - Изменение температуры пористой среды ( $T$ ) за период измерений на высоте 30 мм (кривые 1 и 1') и 450 мм (кривые 2 и 2') от дна стенда. Сплошные линии (1 и 2) – теоретический расчет, пунктирные линии (1' и 2') – экспериментальные данные [Климшин А.В., Миндубаев М.Г., Колотухин А.Э., 2011]

Коэффициент температуропроводности  $\kappa_{ef} = 2,6 \cdot 10^{-7}$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ) подобран на основе сравнения экспериментальных и теоретических значений (с использованием выражения (10)) температуры пористой среды на высоте 0,03 м в интервале времени от 2,4 до 26 ч (рис. 8, кривые 1). Различие теоретической и экспериментальной кривых на высоте 450 мм (2 и 2') на рис. 7 указывает на то, что при подогреве снизу температурная волна распространяется в слое пористой среды быстрее, чем это следует из модели

кондуктивного теплопереноса. Это указывает на наличие дополнительного – конвективного механизма переноса тепла.

Измерения плотности потока радона с поверхности пористой среды были проведены при отсутствии и наличии подогрева снизу. При однородном распределении температуры пористой среды среднее значение и стандартное отклонение, определенные по результатам пяти серий измерений плотности потока радона оказались равны 24 и 4 мБк/(м<sup>2</sup>·с) соответственно. При положительном градиенте температуры (подогрев снизу) эти значения стали равны 17 и 12 мБк/(м<sup>2</sup>·с), соответственно. По экспериментальным данным показано, что при возникновении свободной тепловой конвекции воздуха в грунтах может наблюдаться трехкратное увеличение стандартного отклонения значений плотности потока радона.

В третьей главе также приведены результаты численного моделирования миграции радона в почвенном воздухе в условиях свободной конвекции, обусловленной положительным градиентом температуры. Исследования переноса радиоактивной эманации в условиях свободной тепловой конвекции флюида в пористой среде являются новыми. На начальном этапе исследований используется ряд существенных допущений. Рассматривается фильтрационная конвекция в пористой среде для несжимаемого флюида, описываемого приближением Буссинеска. Среда считается изотропной, зависимость коэффициента теплового расширения и вязкости газа от температуры не учитывается. В системе стационарных безразмерных выражений (11)-(14), описывающих перенос радона в условиях свободной тепловой конвекции, использованы следующие единицы. В качестве единицы длины – высота стального цилиндра  $H$ , скорости –  $\kappa_{ef} / H$ , температуры –  $A \cdot H$ , объемной активности радона –  $C_0$ , давления –  $\rho_0 \nu \kappa_{ef} / K$ , где  $\kappa_{ef}$  – эффективный коэффициент температуропроводности среды (м<sup>2</sup>/с),  $A$  – градиент температуры (°С/м),  $K$  – проницаемость пористой среды (м<sup>2</sup>),  $\nu$  – кинематическая вязкость воздуха (м<sup>2</sup>/с),  $C_0$  – равновесная объемная активность радона (Бк/м<sup>3</sup>).

$$\mathbf{u} = -\nabla p + Ra_p T \mathbf{1}_z, \quad (11)$$

$$\mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla^2 T, \quad (12)$$

$$\frac{1}{\eta} \mathbf{u} \cdot \nabla C = \frac{D}{\kappa_{ef} \eta} \nabla^2 C - \lambda^* (C - 1), \quad (13)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (14)$$

В выражениях (11)-(14)  $Ra_p = \frac{\alpha g H^2 A}{\nu \kappa_{ef}} K$  – число Рэлея для пористой среды;

$\lambda^* = \frac{\lambda H^2}{\kappa_{ef}}$  – безразмерная постоянная распада радона;  $\mathbf{u} = \eta \mathbf{v}$  – скорость фильтрации

воздуха в пористой среде;  $\eta$  – пористость среды;  $\mathbf{v}$  – скорость частиц воздуха в порах;  $p$  – давление;  $T$  – температура;  $\alpha$  – коэффициент теплового расширения воздуха (К<sup>-1</sup>);  $g$  – ускорение свободного падения (м/с<sup>2</sup>),  $C$  – объёмная активность радона;  $D$  – коэффициент диффузии радона (м<sup>2</sup>/с).

Рассмотрена двумерная осесимметричная модель свободной конвекции флюида в цилиндре. В такой постановке компоненты скорости фильтрации можно выразить через функцию тока  $\psi$ :

$$u_r = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad u_z = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}. \quad (15)$$

Уравнения (11)-(13) в переменных функции тока  $\psi$  в цилиндрических координатах ( $r$ ,  $\varphi$ ,  $z$ ) преобразуются к следующему виду:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = Ra_p \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (16)$$

$$\frac{1}{r} \left( \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \nabla^2 T, \quad (17)$$

$$\frac{1}{\eta} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{D}{\kappa_{ef} \eta} \nabla^2 C - \lambda^* (C - 1), \quad (18)$$

где  $\nabla^2 = \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$ .

Нижняя и верхняя границы слоя являются изотермическими, а на боковых границах отсутствует тепловой поток:  $T=1$ , при  $z=0$ ;  $T=0$ , при  $z=h$ ;  $\partial T/\partial r=0$ , при  $r=0$  и  $r=R_0$ , где  $R_0$  – радиус цилиндра. Для объёмной активности радона:  $\partial C/\partial r=0$  при  $r=R_0$ ;  $\partial C/\partial z=0$ , при  $z=0$ ;  $C=0$ , при  $z=H$ . Для функции тока:  $\psi=0$ , при  $z=0$ ,  $r=0$ ,  $r=R_0$ ;  $\partial \psi/\partial z=0$ , при  $z=1$ , т.е. верхняя граница принимается проницаемой.

Система стационарных уравнений (16)-(18) вместе с соответствующими граничными условиями, решена методом установления по времени, с использованием консервативной, монотонной неявной схемы конечных разностей. Применялась равномерная пространственная сетка с шагом  $h=0.01$ . При численном моделировании для параметров системы уравнений (16)-(18) приняты следующие значения: коэффициента диффузии радона и эффективной температуропроводности соответственно  $D=10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  и  $\kappa_{ef}=2.6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ , безразмерного значения постоянной распада радона  $\lambda^*=3.33$ , пористости  $\eta=0.5$  и проницаемости  $K=2 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ .

Как следует из рис. 9, с увеличением числа Рэлея  $Ra_p$ , скорость циркуляции флюида возрастает, что приводит к увеличению потока радона у оси цилиндра и уменьшению потока на краях. Кроме этого, с увеличением числа Рэлея  $Ra_p$  снижается интегральное значение объёмной активности радона в области. На рис. 10 представлены плотности потока радона с поверхности грунта  $q$  при соответствующих значениях чисел Рэлея  $Ra_p$ , а также плотность потока в отсутствие конвекции, составляющее  $q \approx 22 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ .

Рассмотренные примеры показывает, что при различных значениях числа Рэлея, которые зависят, главным образом, от градиента температуры и от проницаемости пористой среды, в одних и тех же точках измерения получены различные значения плотности потока радона.

На основании выполненных экспериментальных и теоретических исследований, автор работы не рекомендует проводить измерения плотности потока радона при оценке радоноопасности строительных площадок в период охлаждения поверхности грунтов (в ночное и утреннее время суток, а также в осеннее время года), проницаемость которых выше  $10^{-9} \text{ м}^2$ . Выводы данной работы необходимо использовать при обработке

результатов измерений плотности потока радона, выполненных в условиях охлаждения поверхности почвы.

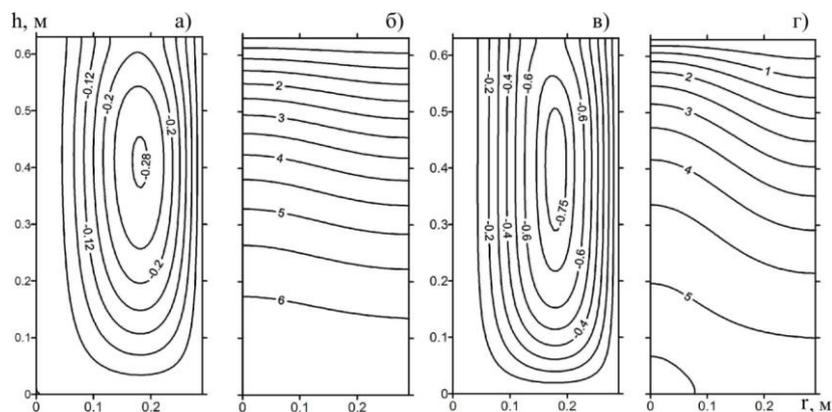


Рис. 8. Изолинии безразмерной функции тока  $\psi$  (а, в) и размерной объёмной активности радона  $C \cdot 10^3$  Бк/м<sup>3</sup> (б, г) при значениях числа Рэлея  $Ra_p=100$  (а,б) и  $Ra_p=140$  (в, г) [Климшин А.В., Миндубаев М.Г., Колотухин А.Э., 2011]

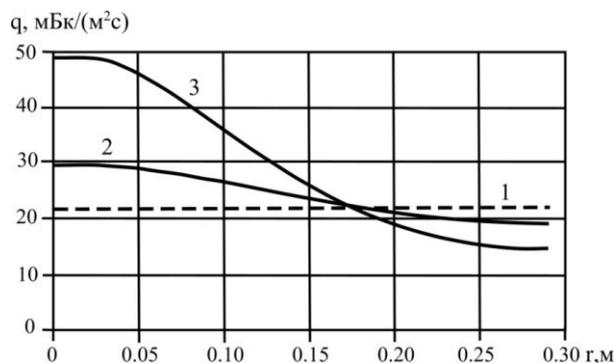


Рис. 9. Расчетные зависимости плотности потока радона с поверхности грунта  $q$  от радиуса стального цилиндра: (1) - в отсутствии конвекции ( $Ra_p=0$ ), (2) - число Рэлея  $Ra_p=100$ , (3) - число Рэлея  $Ra_p=140$  [Климшин А.В., Миндубаев М.Г., Колотухин А.Э., 2011]

В четвертой главе описана математическая модель накопления радона в подземных горных выработках, учитывающая размеры подземного помещения, кратность воздухообмена и способность грунтов выделять радон [Климшин А.В., 2011]. С использованием этой модели проведен расчет ожидаемых уровней ЭРОА радона в воздухе будущих помещений второй линии метрополитена в городе Екатеринбурге.

При разработке модели приняты следующие допущения:

- предполагается, что помещение подземной горной выработки представляет собой цилиндр с длиной  $L$  и с площадью основания  $S_{\text{осн}}$  (рис.11);

- за счет вентиляции через основание цилиндра  $I$  поступает атмосферный воздух с объемной активностью  $C_{\text{атм}}$ , создавая плотность конвективного потока радона  $\vec{j}_1$ ; через основание цилиндра  $II$  воздух с объемной активностью  $C_{\text{нд}}$  выходит, создавая плотность конвективного потока радона  $\vec{j}_2$ ;

- с боковой поверхности выработки в помещение поступает диффузионный поток радона  $\vec{j}_3$ , источники которого (атомы Ra-226) распределены равномерно в горной породе; для упрощения задачи считается, что испусканием радона разрыхленной горной массой и подземными водами можно пренебречь;
- внутри помещения радон распределен равномерно за счет перемешивания воздуха.

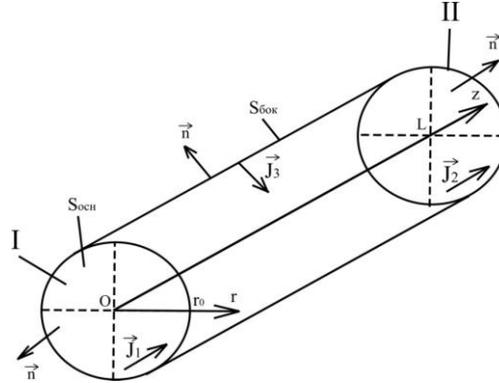


Рис. 10. Схематическое изображение подземной горной выработки [Климшин А.В., 2011]

В результате осреднения уравнения диффузии радона с источником по объему горной выработки получено выражение:

$$\frac{\partial C_{ind}}{\partial t} = -\lambda \cdot C_{ind} - \lambda_v \cdot (C_{ind} - C_{am}) + \frac{\tilde{j}_3 \cdot S_{бок}}{V}. \quad (19)$$

Перенос радона в массиве горных пород описывает уравнение диффузии. В цилиндрической системе координат оно имеет вид:

$$\eta \cdot \frac{\partial C_1}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 C_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial C_1}{\partial r} \right) - C_1 \cdot \lambda \cdot \eta + A_{Ra} \cdot K_{эм} \cdot \rho \cdot \lambda, \quad (20)$$

$C_1$  – объемная активность радона в пористой среде,  $\eta$  – пористость,  $A_{Ra}$  – удельная активность радия-226 в грунтах (Бк/кг),  $K_{эм}$  – коэффициент эманирования радона,  $\rho$  – плотность грунтов ( $кг/м^3$ ). Среднюю по поверхности выработки плотность диффузионного потока радона  $\tilde{j}_3$  можно найти по закону Фика:

$$\tilde{j}_3 = D \cdot \frac{\partial C_1}{\partial r} \Big|_{r=r_0} \quad (21)$$

Система уравнений (19)-(21) с начальными и граничными условиями  $C|_{t=0} = C(r)$ ,  $C_{ind}|_{t=0} = C_{ind0}$ ,  $\frac{\partial C}{\partial r} \Big|_{r \rightarrow \infty} = 0$ ,  $C_1|_{r=r_0} = C_{ind}$ ,  $\frac{\partial C}{\partial r} \Big|_{r \rightarrow r_0} = \frac{\partial C_1}{\partial r} \Big|_{r \rightarrow r_0}$  представляют собой математическую модель накопления радона в подземных горных выработках.

Стационарное решение уравнений (19)-(21) с указанными выше граничными условиями имеет место при  $t \gg \lambda^{-1}$ :

$$C_{ind} = \frac{2 \cdot r_0 \cdot \lambda_v \cdot C_{am} \cdot l \cdot K_0(r_0/l) + D \cdot K_1(r_0/l) \cdot C_0}{2 \cdot (\lambda + \lambda_v) \cdot r_0 \cdot l \cdot K_0(r_0/l) + D \cdot K_1(r_0/l)}. \quad (22)$$

В выражении (22) использованы следующие обозначения:  $K_v(r)$  – модифицированная функция Бесселя второго рода (или функция Макдональда),  $l = \sqrt{D/\lambda \cdot \eta}$  – диффузионная длина радона в грунтах (м),  $C_0 = \frac{A_{Ra} \cdot K_{эм} \cdot \rho}{\eta}$  – равновесная объемная активность радона в воздухе грунтов (Бк/м<sup>3</sup>).

При оценке дозовой нагрузки от радона и его дочерних продуктов распада принято нормировать и контролировать эквивалентную равновесную объемную активность (ЭРОА) радона. При коэффициенте равновесности  $F=0,5$  формула для расчета ЭРОА радона в подземных горных выработках имеет вид:

$$ЭРОА = \frac{2 \cdot r_0 \cdot \lambda_v \cdot C_{ам} \cdot l \cdot K_0(r_0/l) + D \cdot K_1(r_0/l) \cdot C_0}{4 \cdot (\lambda + \lambda_v) \cdot r_0 \cdot l \cdot K_0(r_0/l) + 2 \cdot D \cdot K_1(r_0/l)}. \quad (23)$$

Выражение для расчета минимальной кратности воздухообмена, обеспечивающей безопасный (заданный) уровень ЭРОА в помещении подземной горной выработки имеет вид:

$$\lambda_v = \frac{D \cdot K_1(r_0/l) \cdot C_0 - 4 \cdot \lambda \cdot r_0 \cdot l \cdot K_0(r_0/l) \cdot ЭРОА - 2 \cdot D \cdot K_1(r_0/l) \cdot ЭРОА}{4 \cdot r_0 \cdot l \cdot K_0(r_0/l) \cdot ЭРОА - 2 \cdot r_0 \cdot C_{ам} \cdot l \cdot K_0(r_0/l)}. \quad (24)$$

На рис. 11 приведен расчет ожидаемых уровней ЭРОА радона в подземном тоннеле радиусом  $r_0=3$  м, что приблизительно соответствует размеру тоннеля метрополитена. Рассмотрены три значения кратности воздухообмена: 1)  $\lambda_{v1}=8,3 \cdot 10^{-4}$  (с<sup>-1</sup>) – нормативная кратность воздухообмена для метрополитенов, в соответствии со СНиП 32-02-2003, п. 5.8.4; 2)  $\lambda_{v2}=0,5 \cdot \lambda_{v1}$ ; 3)  $\lambda_{v3}=0$  (с<sup>-1</sup>) – отсутствие вентиляции. В расчетных формулах использованы характерные для грунтов характеристики грунтов: плотность  $\rho=2600$  кг/м<sup>3</sup>, пористость  $\eta=0,15$ , коэффициент эманирования  $K_{эм}=0,1$ , коэффициент диффузии радона  $D=3 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с. Объемная активность радона в атмосферном воздухе принята равной  $C_{ам}=10$  Бк/м<sup>3</sup>. Результаты расчета приведены на рисунке 4.2.

По результатам расчета, безопасный уровень ЭРОА радона – не более 150 Бк/м<sup>3</sup> (норматив указан в МУ 2.6.1.2838 – 11, п. 6.13) будет обеспечен при нормативной кратности воздухообмена, если удельная активность радия-226 в грунтах не превысит 1540 Бк/кг. При снижении кратности воздухообмена в два раза, безопасный уровень ЭРОА следует ожидать, при  $УА_{Ra-226} \leq 770$  Бк/кг. В условиях отсутствия вентиляции, превышение норматива по ЭРОА наступит, если  $УА_{Ra-226} > 5$  Бк/кг.

Описанная в третьей главе математическая модель была использована для расчета ожидаемых уровней ЭРОА радона в будущих помещениях второй линии метрополитена в городе Екатеринбурге. Этот расчет выполнен в ходе инженерно-экологических изысканий с целью оценки потенциальной радоноопасности строительной площадки. Расчет проведен на основании экспериментально определенных значений удельной активности радия-226 в пробах грунтов, и справочных характеристик, которые были определены в зависимости от типов грунтов. Также выполнен расчет максимальных уровней ЭРОА

радона, которые будут наблюдаться в условиях отсутствия вентиляции и определена кратность воздухообмена, необходимая для обеспечения безопасных уровней ЭРОА радона.

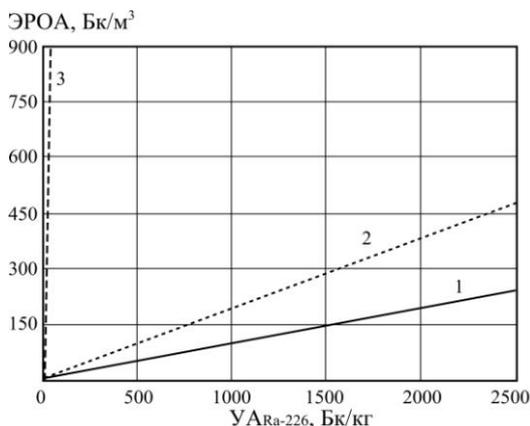


Рис. 11. Теоретический расчет ЭРОА радона в воздухе подземного помещения в зависимости от удельной активности радия-226 ( $УА_{Ra-226}$ ) при различных значениях кратности воздухообмена: 1)  $\lambda_{v1}=8,3 \cdot 10^{-4}$  ( $c^{-1}$ ); 2)  $\lambda_{v2}=0,5 \cdot \lambda_{v1}$  ( $c^{-1}$ ); 3)  $\lambda_{v3}=0$  ( $c^{-1}$ ) [Климшин А.В., 2011]

#### Заключение

1. В результате аналитического обзора информационных источников была обоснована необходимость проведения теоретических и экспериментальных исследований закономерностей переноса радона в приповерхностном слое грунтов в условиях нестационарного температурного поля. Также была обоснована необходимость разработки математической модели переноса радона в подземных горных выработках.

2. Предложена методика мониторинга объемной активности радона и температуры грунтов в естественных условиях. Приведено описание экспериментального полигона, устройств для отбора почвенного воздуха, средств измерений объемной активности радона и температуры, последовательности проведения эксперимента, особенностей обработки экспериментальных данных.

3. На созданном экспериментальном полигоне получены результаты измерений объемной активности радона в почвенном воздухе на глубинах 0,7-0,8 м и 2,5-2,7 м и температуры на поверхности грунтов и на глубинах 1 см, 21 см, 31 см, 51 см, 1 м, 2 м, 3 м. Измерения проведены в условиях промерзания грунтов.

4. Разработана математическая модель переноса радона в грунтах в условиях их промерзания. Рассчитаны поправки, позволяющие учесть влияние промерзания на значения объемной активности и плотности потока радона в зависимости от глубины промерзания и от диффузионных свойств грунтов (рисунок 2.6). Если глубина промерзания и диффузионные свойства грунтов неизвестны, то можно использовать следующие усредненные значения поправок. В результате промерзания ОАР на глубине 0,7 м возрастает в среднем в 1,7 раз, а ППР уменьшается в среднем в 1,8 раз. Таким образом, предложены методические рекомендации по обработке результатов измерений объемной активности и плотности потока радона в зимнее время года.

5. Разработан и изготовлен лабораторный стенд для моделирования процесса свободной тепловой конвекции воздуха в пористой среде, генерирующей радон.

6. На лабораторном стенде получены результаты измерений плотности потока радона с поверхности грунта при положительных градиентах температур, которые могут наблюдаться в естественных условиях в приповерхностном слое грунтов. По экспериментальным данным показано, что при возникновении свободной тепловой конвекции воздуха в грунтах может наблюдаться трехкратное увеличение стандартного отклонения значений плотности потока радона. На основании выполненных оценок, автор работы не рекомендует проводить измерения плотности потока радона с поверхности грунтов, проницаемость которых выше  $10^{-9}$  м<sup>2</sup> при положительных градиентах температуры грунтов (которые обычно устанавливаются в ночное и утреннее время суток, а также в осеннее время года).

7. Предложена математическая модель описывающая перенос радона в почвенном воздухе, в условиях свободной тепловой конвекции. На примере двумерной осесимметричной модели показано, что наличие свободной тепловой конвекции приводит к возникновению неоднородного по площади распределения плотности потока радона с поверхности грунта.

8. Разработана математическая модель переноса радона в подземных горных выработках. Она позволяет рассчитать уровень ЭРОА радона в подземных помещениях по известным свойствам грунтов (плотности, пористости, коэффициентах диффузии и эманирования радона), проектным характеристикам работы вентиляционной системы и габаритам помещения. Модель может быть также использована для расчета минимального значения кратности воздухообмена, необходимого для обеспечения безопасных уровней радона.

9. Рассчитаны ожидаемые значения ЭРОА радона в будущих помещениях второй линии метрополитена в г. Екатеринбурге при нормативной кратности воздухообмена.

#### СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

##### *Публикации в изданиях из «Перечня ВАК...»*

1. Климшин А.В. Актуальные проблемы оценки потенциальной радоноопасности участков застройки//АНРИ,2008.№2.С.18-21.
2. Климшин А.В., Козлова И.А., Рыбаков Е.Н., Луковской М.Ю. Влияние промерзания поверхностного слоя грунтов на перенос радона// Вестник КРАУНЦ, 2010, №2, Выпуск 16, с. 146-151.
3. Демежко Д.Ю., Юрков А.К., Уткин В.И., Климшин А.В. Исследование температурных вариаций в скважине KUN-1 // Доклады академии наук, том 434, №6, 2010, с.811-816.

##### *Прочие публикации:*

4. Климшин А.В. Использование непроницаемого экрана при измерениях плотности потока радона // Уральский геофизический вестник, №1 (10), 2007, с. 39-44.
5. Климшин А.В. Оценка вариаций плотности потока радона при возникновении свободной тепловой конвекции в верхнем слое почвы // Уральский геофизический вестник, № 2, 2009, с. 42-44.
6. Климшин А. В., Козлова И. А., Рыбаков Е. Н., Луковской М. Ю. Экспериментальные и теоретические исследования переноса радона в грунтах в условиях промерзания // Уральский геофизический вестник №2, 2010, с. 41-46.

7. Климшин А.В., Миндубаев М.Г., Колотухин А.Э. Перенос радона в поверхностном слое почвы в условиях свободной тепловой конвекции // Уральский геофизический вестник №1(18), 2011, с.23-30.
8. Климшин А.В. Математическая модель накопления радона в подземных горных выработках // Уральский геофизический вестник №1(18), 2011, с.31-35.
9. Outkin V.I., Yurkov A.K., Klimshin A.V., Kozlova I.A. Geodynamic monitoring in real times // AGU Fall Meeting 2011.
10. Klimshin A.V. Radon flux density and radon soil volume activity seasonal variations associated with the soils freezing // AGU Fall Meeting 2011.
11. Климшин А.В. Актуальные проблемы оценки потенциальной радоноопасности участков застройки // Семинар по проблеме радона в г. Москве.
12. Климшин А.В. Определение плотности потока радона методом экранирования // VIII Уральская молодежная научная школа по геофизике: сборник науч. материалов. – Пермь: Горный институт УрО РАН, 2007, с.119-125.
13. Рыбаков Е.Н., Климшин А.В. Определение зон тектонических нарушений с помощью измерений объемной активности радона // Современные проблемы геофизики. Девятая Уральская молодежная научная школа по геофизике. Сборник материалов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2008, с. 163-165.
14. Климшин А. В. Актуальные проблемы оценки потенциальной радоноопасности участков застройки // Современные проблемы геофизики. Девятая Уральская молодежная научная школа по геофизике. Сборник материалов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2008, с.71-73.
15. Луковской М.Ю., Климшин А.В. Построение цифровой картограммы радоноопасности города Екатеринбурга // XI Уральская молодежная научная школа по геофизике. Сборник докладов. – Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2010, с. 144-146.
16. Козлова И.А., Климшин А.В., Рыбаков Е.Н. Обзор методов оценки потенциальной радоноопасности строительных площадок // Пятые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича. Материалы. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН, 2009, с.244-247.
17. Климшин А.В., Миндубаев М.Г. Моделирование переноса радона в условиях свободной тепловой конвекции почвенного воздуха // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. Шестые научные чтения памяти Ю.П.Булашевича. Материалы конференции. Екатеринбург: УрО РАН, 2011.с.182-184.
18. Климшин А.В., Козлова И.А., Рыбаков Е.Н., Луковской М.Ю. Математическая модель переноса радона в приповерхностном слое грунтов в условиях промерзания // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. Шестые научные чтения памяти Ю.П.Булашевича. Материалы конференции. Екатеринбург: УрО РАН, 2011.с.179-182.
19. Климшин А.В. Методика расчета объемной активности радона в подземных горных выработках// Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. Шестые научные чтения памяти Ю.П.Булашевича. Материалы конференции. Екатеринбург: УрО РАН, 2011.с.176-179.