

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**

**Выжва С.А., Гавриленко О.Д., Онищук, И.И.,
Шабатура А.В., Теут Е.В.**

РАДОНОВЫЙ КОНТРОЛЬ И ИЗМЕРЕНИЯ

учебник

Алматы, 2014

**УДК
ББК
В**

*Утвержден Республиканским научно-практическим центром «Учебник»
Министерства образования и науки Республики Казахстан*

Учебник предназначен для студентов геологических и смежных естественно-научных специальностей высших учебных заведений и специалистов в области геологии, экологии, строительства, радиационной безопасности и других направлений в данной области

Рецензенты:

Дьячков Б. А. - Академик НАН РК, доктор геолого-минералогических наук;
Толстой М. И. - профессор, доктор геолого-минералогических наук, заслуженный деятель науки и техники Украины, Украина Руководитель сектора минералогии;
Бекенова Г. К. - доктор геолого-минералогических наук, Республика Казахстан СИС научно-исследовательской лаборатории «Радиационной физики»;
Онанко А. П. - кандидат физико-математических наук, Украина.

под редакцией доктора геологических наук Выжвы С.А., кандидата геолого-минералогических наук Гавриленко О.Д.

Выжва С. А.
РАДОНОВЫЙ КОНТРОЛЬ И ИЗМЕРЕНИЯ: Алматы, 2014.

**УДК
ББК**

ISBN

© Выжва С. А., Гавриленко О. Д., Онищук
И. И., Шабатура А. В., Теут Е. В. 2014.
© Ассоциация вузов РК, 2014

АВТОРЫ

Выжва Сергей Андреевич, профессор, доктор геологических наук, проректор Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, Украина

Гавриленко Олег Дмитриевич, доцент, кандидат геолого-минералогических наук, проректор Восточно-Казахстанского государственного технического университета имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан

Онищук Иван Иванович, доцент, кандидат геологических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией Теоретической и прикладной геофизики геологического факультета Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, Украина

Шабатура Александр Викторович, кандидат геологических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лабораторией Теоретической и прикладной геофизики геологического факультета Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, Украина

Теут Ева Васильевна, магистр, старший научный сотрудник, инженер-исследователь региональной университетской лаборатории инженерного профиля «ІРГЕТАС», Восточно-Казахстанского государственного технического университета имени Д. Серикбаева, Республика Казахстан

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ВСТУПЛЕНИЕ

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАДОНЕ

1.1 Физические свойства

1.2 Химические свойства

1.3 Схема распада радона-222 и его короткоживущих продуктов

1.4 Медицинское применения радона

1.5 Миграция и концентрирование радона

1.6 Радон, торон и их дочерние продукты распада в окружающей среде

2 МЕТОДЫ, АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА СИСТЕМЫ

РАДОНА И ТОРОНА

2.1 Эманационные методы

2.2 Спектрометрический метод определения концентрации радона (α -метод)

2.3 Радиохимический метод

2.4 Трековые методы

2.5 Фильтрационные методы регистрации радиоактивных газов

2.6 Методы мониторинга радона

2.7 Обеспечение качества измерений

2.8 Приборы для мониторинга радона

2.9 Мониторинг радона и продуктов его распада в воздухе помещений

3 ЭМАНАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ В ГЕОЛОГИИ

3.1 Поисковый эманационный метод

3.2 Радиогидрохимический метод поисков

3.3 Прикладные аспекты эманационных исследований

4 КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ЭМАНАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1 Программа радоновых исследований

5 ПОСЛЕДСТВИЯ И РИСКИ ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ ОТ ОБЛУЧЕНИЯ РАДОНОМ

5.1 Структура доз облучения

5.2 Эффекты радона на здоровье
5.3 Оценка состояния радиационной безопасности
5.4 Механизмы вхождения радона в здания
6 РАДОН-КОРРЕКТИРУЮЩИЕ МЕРОПРИЯТИЯ
6.1 Выбор типа противорадоновой защиты
6.2 Распространенные методы радоновой реабилитации
7 КАРТИРОВАНИЕ РАДОНОВЫХ РИСКОВ
7.1 Районы, подверженные радоновому риску
7.2 Радоновые карты
7.3 Численное моделирование радонового потенциала
7.4 Геоинформационное моделирование радоновых рисков
7.5 Обобщенная схема получения радоновых рисков
ЛИТЕРАТУРА
ПОЛЕЗНЫЕ ССЫЛКИ
ГЛОССАРИЙ
ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИЙ РАДОНА
ПЕРЕВОДНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ
РАДОНОВЫЕ КАРТЫ И КАРТЫ РАДОНОВЫХ РИСКОВ
РЯДА СТРАН ЕВРОПЫ И США

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

| | |
|---------------|--|
| <i>EPA</i> | Агентство защиты окружающей среды США (US Environmental Protection Agency) |
| <i>ASD</i> | Активная расконсервация почвы |
| <i>Q, q</i> | Активность эманации |
| α | Альфа распад, альфа-частица |
| <i>ATD</i> | Альфа-трековый детектор |
| β | Бета-распад, бета-частица |
| <i>БУ</i> | Блок управления |
| θ | Время фильтрации воздуха, мин |
| γ | Гамма-излучение, гамма-квант |
| <i>h</i> | Глубина (толщина), м |
| <i>P</i> | Давление, Па |
| <i>ACD</i> | Детектор на основе активированного угля |
| <i>ДПР</i> | Дочерние продукты распада радона |
| <i>ДПТ</i> | Дочерние продукты распада торона |
| <i>LSC</i> | Жидкостно-сцинтилляционный счетчик |
| D_B | Коэффициент диффузии, м ² /с |
| k_n | Коэффициент пористости, % |
| ε | Коэффициент чувствительности |
| α_0 | Коэффициент растворимости радона в жидкости |
| k_s | Коэффициент эманирования, б.р. |
| <i>МКРЗ</i> | Международный комитет радиационной защиты |
| <i>DTD</i> | Метод дублированного альфа-трека |
| <i>n</i> | Мощность вентиляции (кратность воздухообмена) |
| <i>CRM</i> | Непрерывный монитор радона |
| <i>СТМ</i> | Непрерывный монитор торона |
| <i>V</i> | Объем, л |
| <i>ОА, a</i> | Объемная активность |
| <i>b</i> | Перенос почвенного газа |
| <i>ППР,</i> | Плотность потока радона |
| <i>q</i> | |
| δ | Плотность породы (почвы), кг/м ³ |
| <i>ПД</i> | Полупроводниковый детектор |
| λ | Постоянная распада радона, $\lambda=1,26 \cdot 10^{-4}$ мин ⁻¹ |

| | |
|--------|---|
| ПУ | Предварительный усилитель |
| I, i | Скорость счета, показания |
| v | Скорость фильтрации воздуха, л/мин |
| e | Скорость эксгаляции, Бк·м/с |
| N | Содержание (концентрация) эманации |
| ФЭУ | Фотоэлектронный умножитель |
| T | Температура, °C |
| ЭРОА | Эквивалентная равновесная объемная активность |
| ЕІС | Электретная ионная камера |
| ЕІD | Электронное интегрирующее устройство |
| ЭТМ | Эманационно-трековый метод |
| Э | Эманирование |

ВСТУПЛЕНИЕ

Система радона и торона, несмотря на большое количество посвященных им исследований, остается малоизученной благодаря своей сложности и большому числу значимых факторов, определяющих ее состояние.

Детальные, системные и мониторинговые исследования системы радона, торона и их ДПР в различных средах являются необходимыми для правильного и экономически обоснованного выбора мероприятий по уменьшению радоновой опасности.

На современном этапе главное внимание исследователей сосредоточено на нескольких актуальных направлениях эманационных изысканий.

Во-первых, до сих пор сохраняется востребованным традиционное приложение эманационного метода, связанного с радиометрическим изучением геологических отложений. Этот метод применяется в связи с поисками радиоактивного сырья, трассированием тектонических нарушений и зон повышенной проницаемости чехла, отслеживания водоносных горизонтов обогащенных радием и т.д.

Изучение радонового потенциала локальных территорий, применение математического аппарата к его описанию, картирование радоновых рисков с помощью современных геоинформационных технологий все более активно применяется при эманационных исследованиях. Одним из важных составляющих определения радонового потенциала является установление связи радонового уровня с различными геологическими характеристиками. Прежде всего, это относится к работам при картировании областей, где геологические комплексы владеют стойкими значениями между содержаниями «уран/радий-радон».

Особое место в эманационных изысканиях занимают измерения радона в воздухе помещений. Этот вид работ составляет основной объем современных радоновых программ. Несмотря на огромный массив ежегодных измерений радона внутри помещений, еще существует много малоизученных направлений, связанных с особенностями вхождения радона в помещения, его распределения внутри здания, построения

математических алгоритмов расчета динамики и миграции радона из почвенного воздуха в воздух помещений и т.д.

Формирование и выполнение национальных радоновых программ невозможно без включения в их состав способов составления карт радоновых рисков, которые, с одной стороны, охватывали бы всю территорию страны, решали поставленные задачи, а с другой, были экономически эффективны. В любом случае, построение карт радоновых рисков сразу дает исследователям мощный инструмент массового и оперативного контроля и мониторинга радоновой опасности, позволяет проводить расчеты коллективных и индивидуальных дозовых нагрузок, формировать и корректировать санитарные и радиационные нормы и правила, вводить рекомендации касательно различных активных и пассивных мероприятий по снижению уровня радона.

В основу настоящей работы использованы материалы по радоновой тематике, проводимые в странах Европы и США, так и собственные исследования авторов, проведенные в рамках различных радиоэкологических программ Украины, Казахстана.

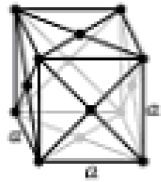
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАДОНЕ

1.1 Физические свойства радона

Радон – бесцветный, без запаха и без вкуса газ, и поэтому не ощущается человеком. При стандартной температуре и давлении радон представляет собой моноатомный газ с плотностью 9,73 кг/м³. Это наибольшая плотность среди газов при комнатной температуре и наибольшая плотность среди благородных газов. Радон в 55 раз тяжелее гелия, в 7,5 раз тяжелее воздуха (на уровне моря плотность воздуха составляет $\rho_{\text{воз}}=1,217 \text{ кг/м}^3$) (табл. 1).

Таблица 1 – Физические свойства радона

| Название | Радон) | Категория элементов | Благородные газы |
|----------------------|--|-------------------------------|--|
| Символ | Rn | Группа | 18 |
| Порядковый номер | 86 | Стандартный атомный вес | 222 |
| Открытие | Фридрих Эрнст Дорн (1900) | Электронная конфигурация | [Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ² |
| Получение | Уильям Ремзи и Роберт Уитлов-Грей (1910) | | 2, 8, 18, 32, 18, 8 |
| Фаза | Газ (бесцветен) | Плотность, (0°C, 101,325 кПа) | 9,73 г/л |
| Парциальное давление | | Плотность жидкой фазы | 4,4 г/см ³ |
| P (Па) | T (К) | Точка плавления | 202 К, -71 °С, -96 °F |
| 1 | 110 | Точка кипения | 211,5 К, -61,7 °С, -79,1 °F |
| 10 | 121 | Критическая точка | 377 К, 6,28 МПа |
| 100 | 134 | Теплота плавления | 3,247 кДж/моль |
| 1000 | 152 | Теплота испарения | 18,10 кДж/моль |
| 10000 | 176 | Удельная молярная | 20,786 Дж/моль·К |

| | | | |
|---------------------|-------------------|--|------------|
| 100000 | 211 | теплоемкость | |
| Состояния окисления | 6, 2, 0 | Кристаллическая структура | Немагнитен |
| Электронегативность | 2,2 (шкала Паули) | | |
| Энергия ионизации | 1037 кДж/моль |  | |
| Ковалентный радиус | 150 пм | | |
| Теплопроводность | 3,61 мВт/м·К | Радиус Ван-дер-Ваальса | 220 пм |

1.2 Химические свойства радона

Радон, радиоактивный химический элемент VIII группы периодической системы Менделеева с атомным номером 86, является инертным газом. В соответствии с положением в периодической системе элементов его валентность равна 0. Однако, как и большинство других благородных газов, он может образовывать некоторые соединения за счет ван-дер-ваальсовых сил - т.н. *клатраты*.

Радон довольно хорошо растворим в воде. В случае динамического равновесия между водой и воздухом, при температуре 18 °С в единице объема воды растворяется 0,285 частей радона. Значительно выше растворимость радона в неполярных органических жидкостях. Для эфира приведенная выше величина составляет 15,08, для сероуглерода - 23,14.

Радон легко адсорбируется различными твердыми сорбентами. Особенно велика его адсорбция на активированном угле. Полная десорбция радона с угля происходит при температуре 300-400 °С.

1.3 Схема распада радона-222 и его короткоживущих продуктов

Радон не имеет стабильных изотопов. Описано 36 радиоактивных изотопов радона с атомными массами от 193 до 228. Наиболее распространенным является радон с атомной массой 222 (табл. 2).

Таблица 2 – Главные изотопы радона

| Обозначение | Происхождение | Период полураспада | Тип превращения | Энергия, МэВ | Дочерний продукт |
|-------------------|---------------|--------------------|-----------------|--------------|-------------------|
| ^{210}Rn | синтезирован | 2,4 часа | α | 6,404 | ^{206}Po |
| ^{211}Rn | синтезирован | 14,6 часов | ϵ | 2,892 | ^{211}At |
| | | | α | 2,965 | ^{207}Po |
| ^{222}Rn | следы | 3,8235 дня | α | 5,590 | ^{218}Po |
| ^{224}Rn | синтезирован | 1,8 часа | β^- | 0,8 | ^{224}Fr |

В цепочках распада радона и торона существенный вклад в излучение системы вносят всего 11 радионуклидов, включая собственно радон ^{222}Ra и торон ^{220}Rn . Они различаются как по типу излучения, так и по энергии частиц и гамма-квантов (рис. 1).

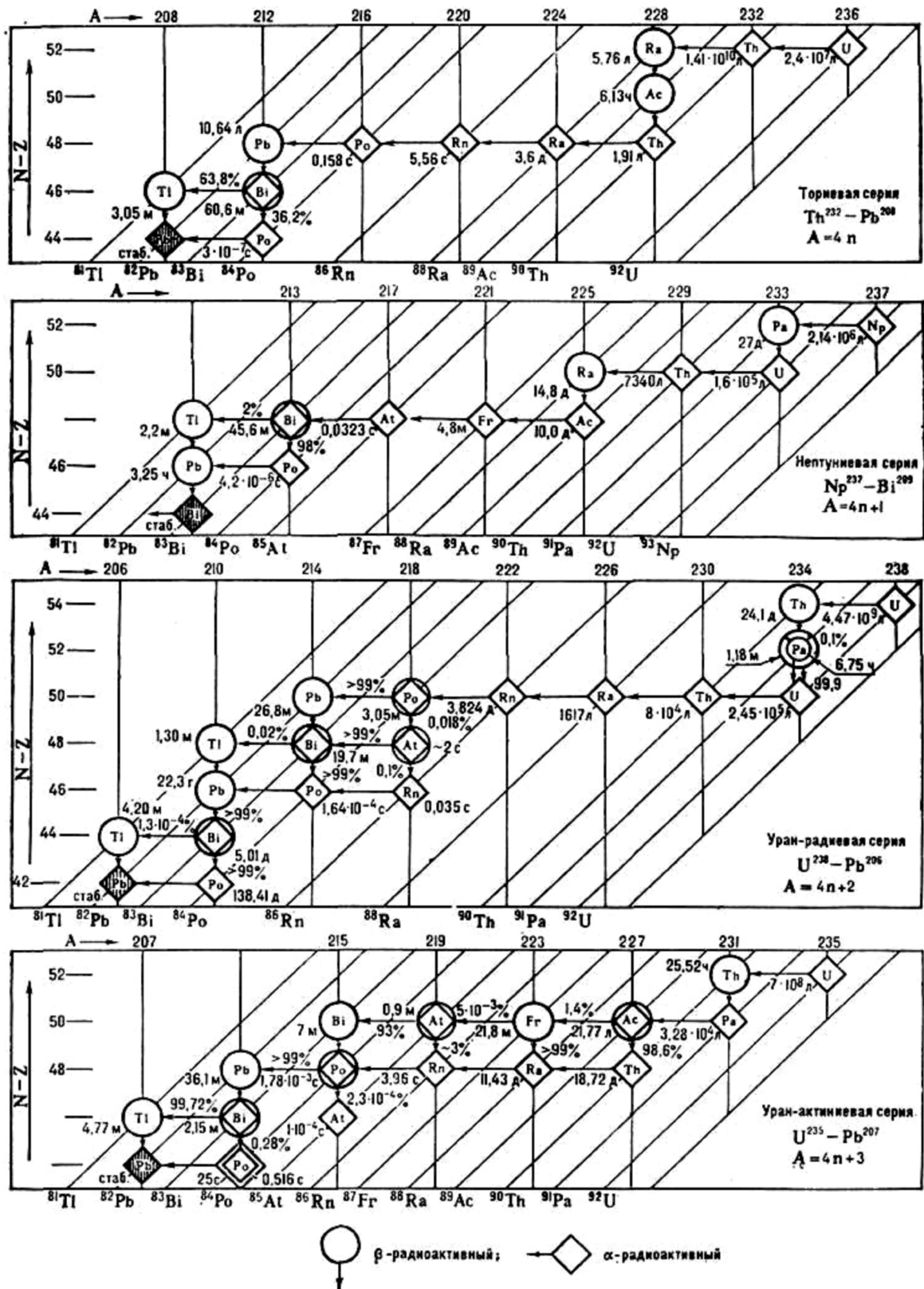


Рис. 1 – Схемы радиоактивных превращений основных семейств естественных радионуклидов

При распаде радона производятся новые радиоактивные элементы, называемые *продуктами распада радона* (англ. radon

daughters или radon progeny). В отличие от газообразного радона, продукты радона являются твердыми веществами с механизмом взаимодействия наподобие частиц пыли в воздухе или аэрозолей.

Вследствие малых периодов полураспада, уже после 12 их циклов (приблизительно 43 дня) радиоактивность радона составляет всего лишь 1/2000 от первоначального уровня.

Часто в измерительных схемах приводятся генетические обозначение дочерних продуктов распада радона, торона и актинона:

| | | | | | | | | |
|------|---|-------------------|-------|---|-------------------|-----|---|-------------------|
| Rn | – | ²²² Rn | ThX | – | ²²⁴ Rn | AcX | – | ²²³ Rn |
| RaA | – | ²¹⁸ Po | Tn | – | ²²⁰ Ra | An | | ²¹⁹ Rn |
| RaB | – | ²¹⁴ Pb | ThA | – | ²¹⁶ Po | | | |
| RaC | – | ²¹⁴ Bi | ThB | – | ²¹² Pb | | | |
| RaC' | – | ²¹⁴ Po | ThC | – | ²¹² Bi | | | |
| RaD | – | ²¹⁰ Pb | ThC' | – | ²¹² Po | | | |
| RaE | – | ²¹⁰ Bi | ThC'' | – | ²⁰⁶ Tl | | | |
| RaF | – | ²¹⁰ Po | ThD | – | ²⁰⁸ Pb | | | |
| RaG | – | ²⁰⁶ Pb | | | | | | |

Используем их для описания главных изотопов радона: ²²²Rn (радон), ²²⁰Rn (торон) и ²¹⁹Rn (актинон). Их общая черта - небольшие, но отличающиеся друг от друга периоды полураспада: $T_{Rn}=3,8$ дня, $T_{Tn}=54,5$ сек, $T_{An}=3,9$ сек. Они являются продуктами распада радия и относятся к трем естественным радиоактивным семействам: урана, тория, актиния. Наиболее стабильный изотоп - радон-222 – продукт распада радия-226, который, в свою очередь, произошел от урана-238. В следовых количествах выявляются содержания очень нестабильного изотопа радона-218 – дочернего продукта радона-222. Три других изотопа радона имеет период полураспада больше 1 часа: радон-211, радон-210 и радон-224.

Группа радона объединяет пять элементов: Rn, RnA, RnB, RnC и RnC' (рис. 2). Изотоп RnC'' можно не учитывать, так как он образуется из 0,04% атомов RnC. Равновесие в группе наступает через 2,6 часа. Радоновая групп не может долго существовать самостоятельно, так как радон и продукты его распада полностью распадаются или накапливаются до равновесия с радием через 23 дня. Нарушение равновесия этой группы с группой радия преимущественно обусловлено эманированием.

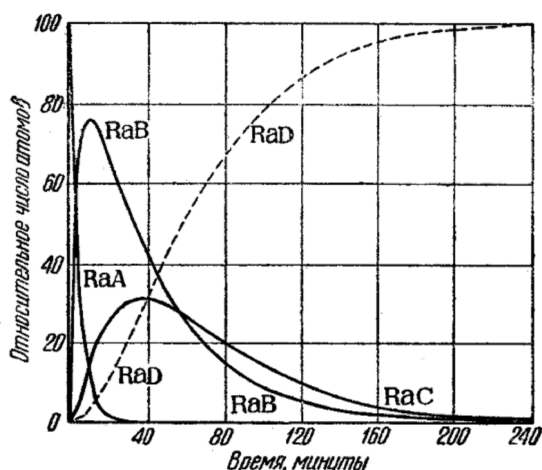


Рис. 2 – Изменение числа атомов в цепи распада $RnA \rightarrow RnB \rightarrow RnC \rightarrow RnD$ (в t_0 присутствовал только RnA) [12]

Альфа-излучателями группы являются Rn, RnA и RnC', каждый из которых испускает по 12,5% α -частиц от общего их количества в урановом ряду. Гамма- и β -излучение группы обусловлено RnB и RnC. RnB характеризуется сравнительно мягким β - и γ -излучением; наибольший выход имеют γ -кванты с энергией 0,35 МэВ (0,435 γ -кванта на распад): их доля составляет 17,7% от общего количества гамма-квантов равновесного уранового ряда. Бета-частицы RnB имеют максимальную энергию 0,65 МэВ. RnC обладает более жестким излучением; отмечен наибольший выход γ -квантов с энергией 0,609; 1,120 и 1,764 МэВ, составляющих соответственно 14,6; 11,2 и 8,9% общего количества γ -квантов ряда. Максимальная энергия γ -лучей равна 2,43 МэВ (2,2% от общего количества γ -излучения ряда). Максимальные энергии β -частиц RnC равны: 1,0; 1,51; 1,88 и 3,26 МэВ.

На радоновую группу в урановом ряду приходится 37,5% α -частиц, 40% β -частиц и 88% γ -квантов.

Группа радия D объединяет три элемента: RaD, RaE и Po. равновесие между RaD и RaE наступает через 30 дней, а между RaD и Po – через 1,4 года. Практически полный распад RaD или его накопление до равновесного состояния с элементами группы радона происходит за 130 лет.

Альфа-излучателем группы является Po , β -излучателем (с максимальной энергией β -частиц 1,17 МэВ) – RaE . На группу RaD приходится 12,5% α -частиц и 20% β -частиц равновесного уранового ряда; фактически вклад β -излучения группы RaD значительно меньше, так как это излучение почти полностью поглощается низкоплотностным фильтром [12].

Ряд тория содержит шесть α -излучателей: Th , $RdTh$, ThX , Tn , ThA , $Th(C+ C')$ и три β -излучателя, которые одновременно являются гамма-излучателями: $MsTh_2$, ThB и $Th(C+ C'')$; четвертый β -излучатель - $MsTh1$ - не имеет практического значения, так как обладает мягким излучением ($E_{max}=0,054$ МэВ). В равновесии элементы ряда испускают 2,79 γ -кванта на распад.

Накопление радиоактивных элементов в ряду тория происходит несоизмеримо быстрее, в ряду урана, поэтому нарушение равновесия в этом ряду встречаются сравнительно редко и выражены в менее резкой форме. В природных условиях они могут возникать только при систематическом переотложении тория, радиотория и мезотория, а в лабораторных условиях - при анализах сильноэманулирующих проб.

Радиоактивные элементы ряда тория разделены на четыре группы, рассмотрим группу торона. *Торон* – газообразный продукт естественного распада наиболее стабильного изотопа тория (тория-232) испускающего γ -излучение.

Группа торона группа состоит из шести элементов: Tn , ThA , ThB , ThC , ThC' , ThC'' . Равновесие в группе наступает через 2,5 дня; через такой же промежуток времени устанавливается равновесие с группой радиотория. Элементы группы самостоятельно существовать не могут. Возможное нарушение равновесия с группой радиотория обусловлено эманулированием.

Альфа-излучателями являются Tn , ThA , $Th(C+ C')$; выход α -частиц указанных элементов составляет 50% общего выхода α -частиц равновесного ториевого ряда. Бета- и γ -излучение элементов группы связано с распадом ThB и $Th(C+ C')$. Торий В характеризуется сравнительно мягким β - и γ -излучением. Гамма-кванты с энергией 0,238 МэВ составляют 12% от общего количества γ -квантов равновесного ториевого ряда (наибольший выход). Бета-лучи ThB имеют максимальную энергию 0,57 МэВ.

У Th(C+ C') отмечается наибольший выход гамма-квантов с энергией 2,62 МэВВ (13% от общего количества гамма-квантов ряда тория). по сравнению с другими естественными радиоактивными элементами излучение Th(C+C') является наиболее жестким: максимальная энергия β -частиц ThC равна 2,25 МэВ, а ThC'' - 1,79 МэВ.

Альфа-излучатель радон-219 или актинон (An) принадлежит к ряду актиноурана, группе актинона и является продуктом распада актиния-227. Группа актинона включает: собственно актинон, актиний А, актиний В, актиния С и актиний С''. Равновесие в группе наступает через 3,5 часа; через такой промежуток времени элементы группы приходят в равновесие с группой актиния. На актиноновую группу приходится 28,5 % α -частиц, 66,7 β -частиц и 12,6 % γ -квантов равновесного актиноуранового ряда [12].

В серии нептуния-237 не встречено никаких изотопов радона, хотя были обнаружены следовые количества очень нестабильного радона-217.

Задача. Образование ряда последовательных продуктов распада радиоактивного изотопа. Имеется ряд элементов: $A \rightarrow B \rightarrow C$. Этому ряду отвечает число атомов продуктов распада N_1, N_2, \dots, N_i ; и радиоактивных постоянных $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i$.

При условии, что в начальный момент времени присутствовал только первый изотоп, количество которого $N_1 = N_{1,0}$, а $N_2 = N_3 = \dots = N_i = 0$, количество атомов любого элемента N_i в момент времени t найдется по выражению [22]:

$$N_i = N_{1,0} \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_{i-1} \times \left[\frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \dots (\lambda_i - \lambda_1)} + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2) \dots (\lambda_i - \lambda_2)} + \dots + \frac{e^{-\lambda_i t}}{(\lambda_2 - \lambda_i)(\lambda_3 - \lambda_i) \dots (\lambda_{i-1} - \lambda_i)} \right] \quad (1.1)$$

Рассмотрим частный случай, когда используется отношение числа атомов данного изотопа к числу атомов первого изотопа

$$\frac{N_i}{N_1} \cdot \frac{N_i}{N_1} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_{i-1}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \dots (\lambda_i - \lambda_1)}. \quad (1.2)$$

Если $\lambda_1 \ll \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_{i-1}$ получим $\frac{N_i}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_i}$ - т.е. выражение векового равновесия.

Если первый изотоп является долгоживущим, и если цепочка изотопов образуется при непрерывно текущей ядерной реакции, то будет иметь силу соотношение: $\lambda_1 \ll \lambda_i$ и $N_1 \lambda_1 = A$, тогда

$$N_i = A \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_{i-1} \times \left[\frac{1}{\lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \dots \lambda_i} + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2 (\lambda_3 - \lambda_2) \dots (\lambda_i - \lambda_2)} + \frac{e^{-\lambda_3 t}}{\lambda_3 (\lambda_2 - \lambda_3) (\lambda_4 - \lambda_3) \dots (\lambda_i - \lambda_3)} + \dots + \frac{e^{-\lambda_i t}}{\lambda_i (\lambda_2 - \lambda_i) (\lambda_3 - \lambda_i) \dots (\lambda_{i-1} - \lambda_i)} \right] \quad (1.3)$$

1.4 Медицинские применения радона

Облучение радоном – известный способ получения радиационного гормезиса, применяется для смягчения действия таких аутоиммунных заболеваний как артрит, ревматизм и др. На сегодняшний день существует много радоновых лечебниц (в том числе и «шахт-лечебниц»), где применяют обогащенные радоном воду и воздух (рис. 3).



Рис. 3 – Радоновая ингаляция в лаборатории [52]

Радиоактивные лечебные ванны начали применяться с 1906 года в Иохимове, Чехия; Бад-Гаштайне, Австрии; Мисасе, Япония. Всемирно известные радоновые курорты Боулдер (Монтана, США); Бад-Кройзнах, Бромбах, Баден-Баден (Германия) имеют источники с высокообогащенным радием водой. Считается, что достижение концентрации радона в минеральной воде величины 2-5 нКи/л (74-200 кБк/м³) является терапевтическим уровнем. В Украине воды с содержанием радона более 185 Бк/дм³ являются минеральными (радоновыми) и используются в медицине (рис. 4).

Концентрация радона в минеральных радоновых водах колеблется в весьма значительных пределах. Например, активность минеральной радоновой воды в 2000 кБк/м³ в Мерано и 4000 кБк/м³ в Луризии (Италия), 0,780 Бк/дм³ - Баден-Баден (Германия); Барбанштайн (Австрия) – 2200 Бк/дм³; Яхимов (Чехия) – 6290 Бк/дм³; Кисловодское (РФ) – 248 Бк/дм³, Железноводское (РФ) – 314 Бк/дм³; Вишневогорское (РФ) – 552 Бк/дм³, Дарасун (РФ) – 547 Бк/дм³; Белокураха (РФ) – 926 Бк/дм³ [6, 27].

На базе Хмельницкого месторождения радоновых вод (Винницкая область, Украина) функционирует 6 санаториев; эксплуатационные запасы радоновых вод 2000 м³/сутки.



Рис. 4 – Радоновая терапия с помощью минеральной воды (Rn-222 -1700 Бк/л, CO₂ - 2000 мг/л) [86]

По концентрации радона в естественных источниках различают:

- 1) воды с малой концентрацией радона - от 0,2 до 1,5 кБк/л;
- 2) воды со средней концентрацией радона - от 1,5 до 7,5 кБк/л;
- 3) воды с высокой концентрацией радона - $>7,5$ кБк/л.

Действие радиоактивных излучений определяется величиной поглощенной организмом дозы излучения. Предельно допустимое облучение больного (на курс лечения) составляет при приеме водных ванн концентрацией 34 кБк/л [6].

Употребление радиоактивных вод как часть радоновой терапии практиковалось в Бад-Брамбахе (Германия); ингаляционная терапия в Гаштайнер-Хайштоллене (Австрия), Свиридов-Здрое, Чернява-Здрое, Ковары, Лядек Здрой (Польша), Боулдер (США) (рис. 3). Минимальная действующая концентрация радона для питья считается 4000 Бк/л; предельно допустимое - до 2,7 МБк [6].

В США и ряде стран Европы существуют лечебницы и курорты с «*радоновыми спа*», где пациенты в течении нескольких минут или часов находятся в высокорадоновой атмосфере. Концентрация радона в воздухе в Gastein Healing Gallery (рис. 5) (непроевентрируемые условия) достигает средних значений в 43 кБк/м³ (1,2 нКи/л) с максимальным значением 160 кБк/м³ (4,3 нКи/л). Предельно допустимые концентрации радона при ингаляционной терапии составляет при вдыхании радона и его продуктов - до 0,7 кБк/л; воздушных ванн - 9,4 кБк/л [6].



Рис. 5 – Радоновая терапия в теплой подземной радоновой галерее (Gastein Healing Gallery). Диапазон значений радона 40 - 100 кБк/м³ [86]

С другой стороны, практическое медицинское использование радона ограничивалось явными и многочисленными последствиями облучения организма высокими дозами радиации.

В технике и промышленности производство радона строго регламентируется. Небольшие его количества используют для калибровки средств измерения ^{222}Rn . При этом стоимость его составляет 6000\$ на миллилитр раствора радия, содержащего 15 пкг актуального радона.

1.5 Миграция и концентрирование радона

Выделение эманаций из жидкости или твердого тела (минеральных зерен пород или почвы) носит название *эманирования*. Часть атомов эманаций (Rn , Tn , An), образующихся при распаде изотопов радия попадает в поровое пространство, заполненное газом или жидкостью.

Прежде чем оказаться в атмосфере, радиоактивные эманации должны миновать поры грунта за время своего полного радиоактивного распада. Этот процесс прохождения через радиоактивные газы в атмосферу контролируется двумя процессами:

1) непосредственным переносом через поры грунтов в атмосферу;

2) эманированием.

Доля радона, которая смогла проникнуть в поры, характеризует *эманирующую способность* (Э). Эманирование зависит от плотности распределения урана и радийсодержащих минералов, числа дефектов в минерале и, самое главное, площади поверхности урансодержащих минеральных фаз. Таким образом, значение в эманировании радона можно лишь отчасти объяснить концентрацией урана в горных породах, а в основном определяется *отдачей* и *диффузией*.

Основным фактором эманирования является отдача. После распада ^{224}Ra или ^{226}Ra атомы торона и радона приобретают кинетическую энергию соответственно 123 и 86 кэВ, что иногда позволяет перейти в газовый состав пор.

Будучи инертным газом, радон свободно мигрирует через трещины, разломы и проницаемые рыхлые грунты. Поэтому рыхлые и сильнотрещиноватые породы (зоны тектонических нарушений, коры выветривания и т.д.), обладающие наибольшей поверхностью, характеризуются повышенным эманированием. Эманирующая способность радона из грунтов составляет 1-50 %, а торона - примерно в 5 раз меньше.

Коэффициент эманирования может изменяться от долей процента в породах (почвах) с плотной кристаллической решеткой до 95-98% в сильноразрушенных породах. Широкий интервал изменения коэффициента эманирования затрудняет интерпретацию результатов эманиционной съемки, поскольку возможно образование значительных аномалий в породах с умеренной радиоактивностью, но высоким коэффициентом эманирования (табл. 3).

Табл. 3 – Коэффициенты эманирование в некоторых типах почв

| Породы | k_2 |
|------------------------------|-------|
| Валуны | 15-40 |
| Песок | 15-30 |
| Глина | 30-70 |
| Измельченные породы (1-8 мм) | 5-15 |
| Измельченные породы богатые | 15-30 |

| | |
|-----------------|--|
| ураном (1-8 мм) | |
|-----------------|--|

В земной коре миграция радона происходит либо в газообразном, либо в растворенном состоянии. В результате диффузии, движения подземных вод и почвенного воздуха эманации могут уноситься на значительное расстояние, создавая вокруг рудных тел *газовые ореолы рассеяния*. Явные газовые ореолы наблюдаются над проявлениями урановой или ториевой минерализации, зонами дробления, сопровождающими разломы. Протяженность ореолов обусловлена рядом факторов, в первую очередь - периодами полураспада изотопов радона. Наиболее протяженные (десятки метров) чисто газовые ореолы дает собственно радон. Как правило, ореолы торона, а тем более актинона ничтожно малы. Обычно газовые ореолы сопровождают радиевые солевые ореолы и вследствие этого имеют протяженность в несколько сотен метров.

Количество активности, выходящей через поверхность в единицу времени, называется *скоростью эксгаляции (e)*. Отношение количества эманаций, выделяющихся из породы в ее поры, ко всему количеству образующихся эманаций называют *коэффициентом эманирования K_e* .

Концентрация радона значительно изменяется в зависимости от сезона, атмосферных условий и т.д. (табл. 4). Например, наблюдалось накопление радона в воздухе, если случается метеорологическая инверсия и слабый ветер.

Табл. 4 – Источники глобального атмосферного радона

| Источник | 10^{12} Бк за год |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| Эманация с почвы | 74000000 |
| Грунтовые воды (потенциально) | 18500000 |
| Эманация с океанов | 1110000 |
| Остатки переработки фосфоритов | 111000 |
| Урановые хвосты | 74000 |
| Остатки переработки углей | 740 |
| Природный газ | 370 |
| Сжигание углей | 33,3 |
| Человеческое дыхание | 0,37 |

Задача. Определение эманирования по радону [12]. Для определения эманирования по радону пробу помещают в трубку и тщательно деэманерируют путем продувания струи воздуха в течении 5-10 мин; после этого концы трубки запаивают и оставляют для накопления радона. Радон переводят из трубки в камеру вакуумным способом. Для лучшего извлечения накопившегося радона трубку рекомендуется осторожно перевертывать и встряхивать или пропускать через нее отдельные порции воздуха; переводение эманаций в камеру должно продолжаться не менее 10 мин. Окончив эту операцию, закрывают кран на камере и записывают время окончания перевода; эффект I_{II} от пробы измеряют через 1-3 ч после этого. Эманирующую способность пробы (количество радона выделяемого 1 г пробы) вычисляют по формуле

$$Q_{Rn} = \frac{\varepsilon_i I_{II}}{(1 - e^{-\lambda_{Rn} t_{II}})} P \text{ кюри/г}, \quad (1.4)$$

где ε_i - константа измерительной установки в кюри/дел/мин, определяемая при эталонировании для данного времени накопления распада радона; I_{II} - показания прибора от пробы в дел/мин (имп/мин); t_{II} - время накопления радона в трубке в ч; λ - постоянная распада радона; $(1 - e^{-\lambda_{Rn} t_{II}})$ - поправка на накопление радона за время t_{II} ; P - навеска пробы, г.

Обычно, для определения радона, образующегося в породе, производят радиохимический анализ средней пробы на содержание радия. Зная эманирующую способность и содержание радия в 1 г породы, коэффициент эманирования рассчитывают:

$$K_{\ominus} = \frac{Q_{Rn}}{Q_{Ra}} 100\%, \quad (1.5)$$

где Q_{Rn} - количество радона, выделяющегося из 1 г образца; Q_{Ra} - количество радон, образующегося из 1 г образца (численно равное содержанию радия по радиохимическому анализу).

Задача. Определение эманирования по торону [12]. Эманирование проб по торону определяют при измерениях в проходящей струе воздуха. В этом случае в схему установки вместо барботера с исследуемым раствором включают стеклянную трубку с пробой; скорость струи воздуха определяют экспериментально. максимальный коэффициент использования эманации при определении эманирования достигается при меньших скоростях воздушного потока, чем в случае измерения эманации из раствора. Количество торона, выделяемого из 1 г пробы, вычисляют по формуле

$$Q_{Tn} = \frac{Q_{\ominus} I_{II}}{I_{\ominus} P}, \quad (1.6)$$

где Q_0 - количество торона, выделяемого из эталона; I_p, I_0 - измеренные эффекты соответственно из пробы и эталона; P – навеска, г.

Для определения количества торона, образующегося в породе, производят радиохимический анализ средней пробы на содержание тория. Коэффициент эманирования рассчитывают на основании количества выделяющегося торона и содержания тория Q_{Tn} в образце по формуле

$$K_0 = \frac{Q_{Tn}}{Q_{Tn}} 100\%, \quad (1.1) \quad (1.7)$$

где Q_{Tn} - количество торона, выделяющегося из образца; Q_{Tn} - общее количество торона, образующегося в образце.

Рекомендуется использовать сухие эталоны – сильно эманлирующие препараты пальмитата бария, содержащие ThX или ториевую руду, определив ее эманирование путем сравнения с искусственным эталоном.

Транспортные механизмы эманаций регулируются проницаемостью и насыщением жидкостью (носителем радона в массиве пород) и определяется двумя основными механизмами: *диффузией* и *конвективным потоком*. Движение насыщенных радоном газов зависит от потока жидкостей и характеристики грунта.

Радон в воде переносится медленнее, чем в воздухе. Уже в слое воды в 5 см радон распадается. В почвах с нормальной увлажненностью перенос радона обычно не превышает 2 м; в сухих крупнозернистых почвах – десятки метров.

Миграция радона в воде определяется ее физическими свойствами - парциальным давлением, температурой воды. При падении давления происходит дегазация вод - выделение радона в окружающую атмосферу. С повышением температуры приводит к повышению эманирования, а увеличение давления - уменьшает эманлирующую способность. Влажные породы эманруют больше, чем сухие породы [36].

Математическое выражение динамики потока радона в воде имеет вид:

$$C_{Rnp(s),i} = \frac{C_{Rnp(w),i} \varphi_i (1 - e^{-\lambda_i t})}{\lambda_i}, \quad (1.8)$$

где $C_{Rnp(s),i}$ (Бк/см²) – поверхностная удельная активность; $C_{Rnp(w),i}$ (Бк/см³) – концентрация i -го нуклида в воде; λ_i – постоянная распада; φ_i (см/с) – скорость конвективного переноса.

Диффузия описывается *законом Фика*, а конвективный поток – *законом Дарси*. Средняя величина *коэффициента диффузии* в почве D_B – $5 \cdot 10^{-6}$ м²/с, а диффузионная длина для радона и торона соответственно, равны 0,06-1,5 и 0,0007-0,02 м. Поток торона примерно на 2 порядка величины больше, чем радона. Средняя величина коэффициента диффузии в почве D_B – $5 \cdot 10^{-6}$ м²/с, а диффузионная длина для радона и торона соответственно, равны 1,5 и 0,02 м [72]. Принимая, что средняя концентрация ²²⁴Ra и ²²⁶Ra в почве $A=40$ Бк/кг, e (Rn)= 0,1; e (Tn)=0,05 и плотность почвы $\rho=2000$ кг/м³ были определены средние скорости *эксгаляции* (улетучивания). Они составляют $\Xi=0,026$ Бк·м/с для радона и 1 (Бк·м)/с для торона. Таким образом, поток торона примерно на 2 порядка величины больше, чем поток радона.

Дополнение к диффузии перенос радона в строительных материалах и почве, на которой расположено сооружение, может сильно активизироваться конвективным потоком. Интенсивность конвективного потока определяется наличием градиента давления. Градиент давления может изменяться под воздействием ветра, различия температуры внутри и вне здания, стек-эффектом, нагнетанием или подсосом воздуха в вентиляционной системе. В этом случае скорость перемещения эманаций из почв, как правило, много больше, чем из строительных материалов.

В *модели Новикова-Капкова*, рассматривает массоперенос радона в рыхлых отложениях, как некий установившийся диффузионно-конвективный процесс [23], который описывается следующим уравнением:

$$\eta \frac{dRn}{dt} = D \frac{d^2 Rn}{dx^2} + v\eta \frac{dRn}{dx} - \eta Rn\lambda + Q \quad (1.9)$$

где Rn – концентрация радона в единице объема порового пространства, Бк/см³; η – пористость горной породы, %; D – коэффициент диффузии, см²/с; λ – постоянная распада эманации, с⁻¹; v – скорость конвективного переноса, см/с; $Q = \frac{aRK_s \rho \lambda}{\eta}$ –

скорость выделения эманации в поровое пространство в единице объема среды, Бк·с/см³; Ra – количество радия в породе, г; ρ – плотность породы, г/см³; K_3 – коэффициент эманирования.

Коэффициент диффузии D функционально зависит от влажности и температуры рыхлых отложений. Суточные и особенно сезонные колебания температуры призмического слоя атмосферы определяют соответствующую цикличность колебаний гелиотермозоны, зависит коэффициента диффузии от температуры рыхлых отложений, в соответствии с кинетической теорией газов, оценивается соотношением:

$$D = D_0 \left(\frac{T^k}{273} \right)^\alpha \quad (1.10)$$

где T^k – температура по шкале Кельвина; D_0 – коэффициент диффузии при нормальных условиях; α – константа, значение которой часто принимается равным 0,5.

Существенное влияние на скорость диффузии радона оказывает влажность осадочных пород. При увеличении влажности скорость диффузии уменьшается. По данным В.П.Рудакова [32] при изменении влажности пород до 6% коэффициент диффузии меняется незначительно (в пределах $6 \cdot 10^{-2}$ см²/с); при влажности до 15% составляет $1 \cdot 10^{-2}$ см²/с; а при влажности 17% уже составляет $5 \cdot 10^{-3}$ см²/с. При полном увлажнении пород (~20-25%) коэффициент диффузии достигает величины, характерной для эманации радона в воде $\sim 10^{-5}$ см²/с.

Скорость конвективного переноса v обусловлена движением газовых потоков под действием перепада давления, который определяется атмосферным давлением и колебаниями уровня грунтовых вод. скорость конвективного переноса в проницаемых тектонических нарушениях, связанная с «падением» уровня открытой поверхности зоны насыщения («засасыванием», меняется в пределах $1,5-6,2 \cdot 10^{-6}$ м/с (13-54 см/сут), что близко к скорости конвективного переноса эманации в естественном залегании.

Скорость радоновыделения Q зависит от содержания радия в горных породах, плотности, пористости (трещиноватости), а также эманирующей способности (количественно описанного коэффициентом эманирования) пород, содержащих естественные

радионуклиды. Эманлирующая способность радиоактивных компонентов рыхлых отложений зависит также от температуры гелиотермозоны, что определяет сезонные вариации в поле подпочвенного радона.

Задание. Распределение радона в рыхлых отложениях в модели Новикова-Капкова. Для описаний аномалий эманационного поля на качественном уровне могут быть применены два наиболее распространенных случая [23].

1) случай, когда перенос подпочвенного радона происходит в условиях рыхлых отложений с равномерным и кларковым (низким) содержанием в них радиоактивных элементов;

2) случай с сосредоточенными параметрами, когда перенос эманации осуществляется через отложения от обогащенного радием рудного пласта от водоносного горизонта с минерализованными радиево-радоновыми водами.

Для первого случая, решением уравнения (1.9), при условии $\nu \neq 0$.

$$Rn = \frac{Q}{\lambda\eta} \left[1 - e^{-\left(\frac{\nu\eta}{2D} \sqrt{\left(\frac{\nu\eta}{2D} \right)^2 + \frac{\lambda\eta}{D}} x \right)} \right], \quad (1.11)$$

при граничных условиях: $Rn=0$ при $x=0$ $Rn = \frac{Q}{\lambda\eta}$ при $x=\infty$.

Для второго случая, решением уравнения (1.10), при условии $\nu \neq 0$.

$$Rn = Rn_0 e^{\left(\frac{\nu\eta}{2D} \right) (1-x)} \frac{sh \left[\sqrt{\left(\frac{\nu\eta}{2D} \right)^2 + \frac{\lambda\eta}{D}} x \right]}{sh \left[\sqrt{\left(\frac{\nu\eta}{2D} \right)^2 + \frac{\lambda\eta}{D}} l \right]}, \quad (1.12)$$

при граничных условиях: $Rn=0$ при $x=0$ $Rn = Rn_0$ при $x=l$ (l – глубина залегания эманлирующего объекта).

Для упрощения уравнений, вводятся допущения касательно отсутствием механизма конвективного переноса $\nu=0$ и эффективной постоянной распада, зависящей от пористости $\bar{\lambda} = \lambda\eta$.

Для первого случая

$$Rn = \left[1 - e^{-x \sqrt{\frac{\bar{\lambda}}{D}}} \right]. \quad (1.13)$$

Для второго случая

$$Rn = Rn_0 \frac{\operatorname{sh} \left[\sqrt{\frac{\lambda}{D}} (1-x) \right]}{\operatorname{sh} \left[\sqrt{\frac{\lambda}{D}} l \right]} \quad (1.14)$$

Задание. получить зависимости распределения концентрации радона в верхней части рыхлых отложений, вычисленных по формулам (1.11-1.14) для среды с параметрами $D=0,03 \text{ см}^2/\text{с}$; $\eta=0,25$ и трех значений скорости конвективного потока v : 1) – 0 см/с , 2) – $5 \cdot 10^{-4} \text{ см/с}$; 3) – $5 \cdot 10^{-4} \text{ см/с}$ [137].

Пример. В первом случае концентрация радона с глубиной происходит экспоненциально и, в зависимости от коэффициентов диффузии, выходит на асимптоту на глубинах 5-7 м. Для случае б) видно, что в этом случае при возникновении конвективного потока, принудительно воздействующего на перенос радона в сторону дневной поверхности, аномальное значение концентрации радона на глубине режимных измерений (1-2 м) не может превысить 2-4 кратной величины фонового уровня.

Во втором случае, увеличение концентрации радона с глубиной следует по гиперболической кривой, стремясь к максимальным значениям на «подошве» нерадиоактивного слоя рыхлых отложений мощностью l , над рудным (урановым) объектом или над высокоминерализованными радиево-радоновыми водами, где концентрация радона может на несколько порядков превышать его концентрацию, регистрируемую в спокойный период на глубине 1-2 м. В этом случае при возникновении конвективного потока аномальное значение концентрации радона на глубине 1-2 м, в зависимости от содержания радия и глубины залегания «рудного тела». Может в десятки раз и более превысить фоновый уровень [49].

1.6 Радон, торон и их дочерние продукты распада в окружающей среде

Радиоактивные элементы (U и Th) распространены повсеместно, встречаются в почвах, водах и породах разного состава и в различных концентрациях (табл. 5).

В 1971 году Аполлон-15 прошел 110 км (68 миль) по плато Аристарха на Луне и выявил возрастание альфа-частиц вследствие распада ^{222}Rn .

Радон, образующийся в радиоактивных минералах горных пород, постепенно поступает на поверхность земли, в гидросферу и в атмосферу.

Табл. 5 – Распространенность радона

| Содержание, Бк/м ³ | Распространение |
|-------------------------------|--|
| 1 | Концентрация радона на берегах океанов 1 Бк/м ³ . Следовые концентрации в океанах или Антарктиде могут быть ниже 0,1 Бк/м ³ . |
| 10 | Средние континентальные концентрации в открытом воздухе: 10 - 30 Бк/м ³ . Глобальное среднее концентрации радона внутри помещений оценивается в 39 Бк/м ³ . |
| 100 | Типичная экспозиции внутри домов. Во многих странах концентрация радона 200-400 Бк/м ³ для воздуха внутри помещений является уровнем действия и контрольным уровнем. Ниже уровня 150 Бк/м ³ не нужно проводить никаких противорадионных действий. Кумулятивная экспозиция в 230 Бк/м ³ от радона за период 1 год соответствует 1 WLM. |
| 1000 | Очень высокие концентрации радона найдены в домах, построенных на почвах с высокой концентрацией урана и/или высокой проницаемости грунта. При уровнях 800 Бк/м ³ или выше, домовладельцу следует рассмотреть некоторые типы процедур, уменьшающие уровни радона в воздухе внутри помещений. |
| 10000 | Рабочий уровень в урановых шахтах отвечает 7000 Бк/м ³ . Концентрация в воздухе (невентилируемом) в <i>Gastein Healing Gallery</i> в среднем составляет 43 кБк/м ³ с максимальным значением в 160 кБк/м ³ . |
| 100000 | В среднем 100 кБк/м ³ измерен в фундаменте <i>Stanley Watras</i> . |
| 100000 0 | Концентрации достигают 1000 кБк/м ³ в неvented урановых шахтах. |

Атмосфера. Средняя концентрация радона в атмосфере приблизительно равна $6 \cdot 10^{-20}$ атомов радона на каждую молекулу воздуха, или 150 атомов в каждом миллилитре воздуха ($5 \cdot 10^{-18} \%$ - $5 \cdot 10^{-21} \%$ по объему). Активность радона в целом для земной атмосферы составляет только несколько десятых грамма радона, последовательно замещаясь вследствие распада огромных количеств радия и урана.

Концентрация радона широко изменяется от места к месту. На открытом воздухе она колеблется от 1 до 100 Бк/м³; над океаном еще меньшее – 0,1 Бк/м³. В пещерах или вентилируемых шахтах или плохо проветриваемых домах его концентрация поднимается на 20-2000 Бк/м³.

Количество торона в окружающей среде намного меньше, чем радона вследствие короткого периода полураспада радона-220 (торона) – 55 секунд против 3,8 дня у радона-222. Торон находится, в основном, в непосредственной близости к земной поверхности, а продукт его распада - свинец-212, с периодом полураспада 10,6 ч, проникает в нижние слои тропосферы. Радиоактивное равновесие между радонам и короткоживущими продуктами его распада устанавливается на высоте около 100 м. В континентальных участках земли концентрация дочерних продуктов торона находится в диапазоне 0,05-0,09 Бк/м³, что намного меньше содержания радона.

В зоне аэрации содержание радона более высокое в зоне насыщения, чем в ненасыщенной зоне вследствие диффузионных потерь радона в атмосфере.

Собственно разность концентрации радиоактивных газов в различных природных средах обуславливает очень высокие градиенты концентраций. Главный источник поступления радона-222 в атмосферу (по крайней мере 80% от общего баланса) - эманации с почвы обогащенных продуктами распада урана. В почвах и большинстве добытых из недр строительных материалах концентрация радона и торона в 10 - 10⁴ раз выше, чем в атмосфере, соответственно градиент их концентраций также очень высок и непрерывно поддерживается их генерацией в радиоактивных цепочках U и Th и обеспечивает поток газов в атмосферу. Благодаря разности концентраций радона между почвенным воздухом и атмосферой происходит постоянное выделение его в атмосферу, а непрерывное перемешивание атмосферы приводит к появлению наиболее долгоживущего изотопа радона на высоте 8 км. Над сушей концентрация радона и короткоживущих продуктов его распада убывает с высотой. Поскольку радон имеет относительно большой период полураспада, он и короткоживущие продукты его распада распространяются по всей тропосфере.

Число атомов продуктов распада радона, содержащихся в воздухе, много меньше числа аэрозольных частиц. Поэтому поведению продуктов распада радона, связанных с аэрозольными частицами, полностью определяется особенностями аэрозольной и пылевой загрязнений воздуха.

Гидросфера. Средняя концентрация радона в морской воде - до 0,037 Бк/м³. В незначительных количествах он содержится в растворенном состоянии в водах минеральных источников, озер и лечебных грязях. Хотя высокие концентрации радона можно найти в некоторых водных источниках и термальных водах. Вклад других источников (океан, подземные воды, природный газ) относительно мал.

Хорошая растворимость радона приводит к миграции его преимущественно с природными водами. На миграцию радона в воде большое влияние оказывают гидродинамические условия региона. Дальность переноса радона в большей степени определяется малой продолжительностью его жизни и скоростью движения вод [36]. Оценочные расчеты показывают, что дальность его продвижения от источника по латерали с подземными водами составляет первые метры, при скоростях потоков подземных вод в десятки-сотни метров в год [27].

В раскрытых структурах, где преобладают большие скорости движения вод, дальность миграции радона больше, чем в областях затрудненного водообмена [36]. При увеличении скорости циркуляции вод концентрация радона снижается, если его поступление обуславливается только за счет эманлирующих коллекторов, в условиях низкого содержания радия в породах.

Концентрации радона в водах водоносных горизонтов, где вмещающими породами являются изверженные породы основного состава или осадочные отложения, имеют ОА радона-222 в пределах от 2-5 до 50 Бк/дм³ [27].

В связи с трещинной тектоникой и повышением в них содержания рассеянного урана и радия, концентрация радона может возрасти до первых сотен эман (1 эман = $3,7 \cdot 10^3 \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ (с^{-1} - распад в секунду)). Напорные воды глубоких тектонических трещин нередко сильно обогащены радоном и представляют бальнеологический интерес (радоновые воды азотных терм,

радоновые углекислые воды). В некоторых из этих вод наблюдается небольшое обогащение ураном и радием. В отдельных случаях, когда воды перед выходом на поверхность соприкасаются с рыхлыми, обогащенными радием осадками, содержание радона в них может возрастать до нескольких $3,7 \cdot 10^3$ при кларковых содержаниях урана и радия. Примером могут служить радоновые углекислые воды в травертиновых отложениях.

В водах, дренирующих урановые рудные тела, концентрация радона, как правило, повышается над окружающим фоном. В зависимости от состава руд и рудовмещающих пород эта концентрация колеблется от 50 до десятков тысяч эман. Радон, выделяющийся из урановых руд и подземных вод на урановых рудниках, может достигать высоких концентраций (сотен и тысяч эман) и представлять большую опасность для горняков.

Глубокие водоносные горизонты сильно варьируют по уровням радона и зависят от содержания урана в породе и распределения водоносного горизонта по отношению к массиву горных пород, потока подземных вод и т.д. (табл. 6). Наиболее высокие концентрации урана, радия и радона наблюдаются в подземных водах, в областях питания которых имеются массивы гранитоидов, обогащенных ураном и торием. Уровень ОА радона в подобных условиях, в подземных водах Казахстана иногда в 1000 раз превышает суммарную активность всех других природных радионуклидов [38] и имеют весьма различные уровни.

Табл.6 – Средние концентрации радона в подземных водах

| Водоносный комплекс | Количество измерений | Rn-222 (Бк/м³) |
|--|-----------------------------|----------------------------------|
| Граниты (Сев.Каролина, США) | 24 | 390,8 |
| Граниты (Юж.Каролина, США) | 22 | 298,8 |
| Граниты (Швеция) | 14 | 92 |
| Метаморфические породы - силлиманитовая зона | 35 | 503,3 |
| Метаморфические породы - хлоритовая зона | 56 | 41, |

| | | | |
|--|---------------|-------|-------|
| Гнейсы/кристаллические сланцы (Сев. Каролина, США) | 71 | 83 | |
| Метавулканыты (Сев. Каролина, США) | 21 | 49,9 | |
| Монацитовый пояс высокого давления (Юж.Каролина, США) | 12 | 53,4 | |
| Пояс умеренного давления (Юж.Каролина, США) | 11 | 118,1 | |
| Пояс низкого давления (Юж.Каролина, США) | 7 | 274 | |
| Гнейсы (Швеция) | 8 | 26 | |
| Известняк (Флорида, США) | 165 | 550 | |
| Известняк (Сев. Каролина, США) | 22 | 3,44 | |
| Известняк (Юж.Каролина, США) | 15 | 1,3 | |
| Известняк (Швеция) | 12 | 24 | |
| Неконсолидированный песчаный водоносный комплекс, прибрежная равнина (Сев.Каролина, США) | 139 | 15,76 | |
| Неконсолидированный песчаный водоносный комплекс (Миннесота, США) | 350 | 11,47 | |
| Неконсолидированный песчаный водоносный комплекс в прибрежной равнине (Сев. Каролина, США) | Нижняя часть | 15 | 6,95 |
| | Средняя часть | 34 | 9,47 |
| | Верхняя часть | 29 | 17,34 |

Таким образом, отличия в геохимических свойствах радиоактивных элементов, их содержания, распределения и формы нахождения, химический и газовый состав подземных вод, гидродинамические условия и ряд других факторов приводит к большому разнообразию уровней радона в подземных водах. На рудных месторождениях Казахстана выявлены воды с содержанием радона более 1000 Бк/дм³ [38]. Можно отметить регионы с высоким содержанием радона: Бразилия, Индия, Канада, Иран, скандинавские страны, США, Россия, Украина (300-600 Бк/дм³).

По величине концентрации радона (в Бк/дм³) минеральные воды разделяются на классы:

очень слаборадоновые - 185-740;

слаборадоновые – 740-1480;

радоновые средней концентрации 1480—7400;

высокорадонные больше 7400.

Была разработана более детальная классификация (Токарев А.Н., 1975) которая учитывает не только уровни концентраций радона в подземных водах, но и содержание и форму нахождения радиоактивных элементов (не только радона, но и радия, урана) в горных породах, определяющих возможность обогащения вод радиоактивными элементами, а также геологические условия (гидродинамическую зональность стратисферы и т.д.) [36].

Литосфера. Основным фактором, определяющим геогенный потенциал радона, является минералогия урана. Радон образуется при распаде урана и тория, и знание концентрации урана может оказать помощь в выявлении областей с высоким уровнем выбросов радона.

Кроме, очевидно самих урановых руд, потенциальными источниками урана являются фосфориты, сланцы; различные изверженные и метаморфические породы (граниты, гнейсы и кристаллические сланцы); в меньшей степени - известняки. Наибольшая часть урана в гранитах находится в уранините. Вследствие выветривания большая часть урана удаляется, но большая часть радия остается в реликтовых минералах и из-за большого удельного веса. Эти минералы могут быть эффективными генераторами радона.

В целом, высокие уровни радона связаны с гранитами, сланцами, фосфоритовыми отложениями, некоторыми пляжными песками, содержащими уран или торий (табл. 7). Базальт имеет относительно мало урана (приблизительно только половину от среднего значения пород всех видов). Наоборот, гранит содержит двукратно выше средних значений (≈ 25 Бк/м³).

Имеются статистически обоснованные данные об общем повышении концентрации с увеличением возраста геологических формаций [97-101]. Это, главным образом, связано с сильным дроблением и минерализацией более древних формаций на глубине эрозионного среза.

Табл. 7 – Содержание урана и тория в геологических формациях и комплексах

| Группа пород | Порода | Содержание, 10 ⁴ % |
|--------------|--------|----------------------------------|
|--------------|--------|----------------------------------|

| | | уран | торий | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|--|---------|----------|
| Среднемировое, мг/кг | | 3 | 8 | |
| Осадочные породы | | | | |
| Терригенные (песчано-глинистые) | Конгломерат | 2,4 | 9,0 | |
| | Песчаник, алевролит | 2,9 | 10,4 | |
| | Аргиллит, глинистый сланец, глина | 4,0 | 11,5 | |
| | Кварцевый конгломерат | 6,3 | 31 | |
| Кремнистые | Кремнистый сланец, кварцит | 1,7 | 2,2 | |
| | Глинисто-кремнистый сланец | 2,8 | 6,2 | |
| Карбонатные | Известняк | 1,6 | 1,8 | |
| | Мергель | 2,8 | 2,5 | |
| | Доломит | 3,7 | 2,8 | |
| | Битуминозный сланец | 7,8 | 11,9 | |
| Соленосные | Гипс, ангидрит | 1 | 1 | |
| | Каменная соль | 0,9 | 1 | |
| Каустобиолиты | Каменный уголь | 3,4 | 4,8 | |
| Фосфориты, мг/кг | | 100-400 | | |
| Магматические породы | | | | |
| интрузивные | Известково-щелочная серия | Ультраосновные (дунит, пироксенит и др.) | 0,03 | 0,08 |
| | | Основные (габбро, диабаз) | 0,6 | 1,8 |
| | | Средние (диорит, кварцевый диорит) | 1,8 | 6,0 |
| | | Гранодиорит | 2,1 | 8,3 |
| | | Плагиогранит | 2,7 | 9,6 |
| | | Бiotитовый гранит | 4,0 | 15 |
| | | Лейкократовый аляскитовый гранит | 7,0 | 40 |
| | Граниты нормальные, мг/кг | | 2-6 | 5-20 |
| | Граниты урановые, мг/кг | | 8-40 | 10-100 |
| | Щелочная серия | Мельтейгит, меймечит, ийолит | 2,6 | 9,8 |
| | | Кимберлит | 2,6-3,2 | 8,8-16,3 |
| | | Миаскитовый нефелиновый сиенит | 4,1 | 7,2 |
| | | Агпаитовый нефелиновый сиенит | 10,3 | 28,3 |
| | | Трахибазальт | 2,4 | 8,0 |
| Основные вулканические породы, мг/кг | | 0,1-3 | 1-10 | |
| эффузивные | Трахит, трахилипарит | 3-8 | 30-50 | |
| | Базальт, диабаз | 0,7 | 2,3 | |
| | Андезит, андезитовый порфирит | 1,2 | 4,0 | |
| | Дациит, дацитовый порфирит | 2,5 | 10,0 | |
| | Липарит, кварцевый порфир | 4,7 | 19,0 | |

| Метаморфические и ультраметаморфические породы | | | |
|---|---|----------|------|
| Гнейс, мг/кг | | 2-10 | 2-20 |
| Метаморфические породы – амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фации | Мрамор, мраморизированный известняк | 1,1 | 2,2 |
| | Кварцит | 0,8 | 3,1 |
| | Метаморфизованный песчаник | 2,7 | 9,2 |
| | Кристаллический сланец | 2,6 | 10 |
| | Полевошпатовый гнейс | 3,5 | 15 |
| | Мигматит, гранитогнейс | 3,2 | 16,1 |
| Метаморфические породы – гранулитовой и эклогитовой фации | Эклогит | 0,2 | 0,4 |
| | Амфиболит | 0,7 | 1,8 |
| | Аподиабазовый порфирит | 0,9 | 2,7 |
| | Магнезиально-силикатный сланец | 1,2 | 4,0 |
| | Гиперстеновый гнейс | 0,6 | 2,1 |
| | Плагиоклазовый мигматит, чарнокит | 0,8 | 2,3 |
| | Силлиманит-кордиеритовый гнейс и сланец | 1,3 | 4,2 |
| Амфиболит | 1,0 | 4,0 | |
| Урановые месторождения (0,5-30% урана) | | 10К-300К | |

Горные породы, с которыми связаны высокие источники радона, включают в себя такие типы:

1. Ураноносные метаморфические породы и граниты: разломные зоны в этих образованиях формируют одни из самых высоких радоновых уровней (в некоторых горных областях Колорадо скорость эманаций в полях развития таких пород может превышать $10 \text{ Бк/м}^2 \text{ с}^{-1}$):

верхнепротерозойские граниты Украинского щита, пересеченные разломными зонами, характеризующиеся содержанием урана более 0,001-0,003%.

калиевые, микроклиновые и плагиомикроклиновые граниты протерозойско-архейского возраста с содержанием урана более 0,005%;

гранитизированные архейские гнейсы, в которых урана более 3-5 г/т [27];

2. Морские черные сланцы и углистые сланцы с содержанием урана более 0,002 %.

3. Ледниковые отложения с урансодержащими породами и осадками. Они имеют высокие уровни радона из-за большой площади распространения и высокой проницаемостью вследствие растрескивания после высыхания.

4. Почвы на карбонатных отложениях, особенно карстовый рельеф, который связан с высоким содержанием урана и радия.

5. Ураноносные речные, дельтовые, морские и озерные отложения: углеродисто-глинистые сланцы, глауконитовые и углистые пески и песчаники, углесодержащие гравелиты и алевролиты с содержанием урана более 0,005%.

6. Фосфориты. Обычно максимальная концентрация Ra-226 в фосфоритовых руд составляет около 14800 кБк/г (примерно в 50 раз больше, чем средняя концентрация в почве). Таким образом, руды находящиеся близко к поверхности могут привести к очень высокой локальной концентрации радона.

Почвы. Районы с повышенными концентрациями радона в почвенном газе представляют особый интерес, так как в таком случае мы имеем дело с нормативно-регуляторной базой при новом строительстве. Повышенные значения более чем 100 кБк/м³ типичны для почв на гранитах и вулканитах (табл. 8, 9). Ориентировочные расчеты показывают, что каждая поверхность почвы глубиной 15 см и площадью в 2,6 км² содержит около 1 грамма радия, испускающего радон в атмосферу. Этому количеству радона в глобальном масштабе отвечает активность в 90 ТБк за год.

Табл. 8 – Среднее содержание естественных радионуклидов в почвах

| Типы почв | K-40, % | Th-232, мг/кг | Ra-226, Бк/кг |
|--|---------|---------------|---------------|
| Усредненная почва | 1,5 | 8 | 35 |
| Эоловые песчаные – илистые | 0,5-3 | 0,5-5 | 5-20 |
| Пески | 0,5-3 | 0,5-20 | 5-60 |
| Глины | 0,2-4 | 2-25 | 10-130 |
| Валунная глина, фрагменты кислых пород | 1,5-4 | 6-25 | 10-170 |

Средние содержания урана-238 в подпочвенных грунтах колеблются от $0,6 \cdot 10^{-4}$ до $1,6 \cdot 10^{-4}$ %. Наиболее обогащены подвижным ураном грунты, содержащие органику [272].

Табл 9 – Природные концентрации радия-226 и радона-222 в шведских грунтах глубиной 1 м [20]

| Тип почвы | ^{226}Ra , Бк/м ³ | ^{222}Rn , Бк/м ³ |
|--|--|---------------------------------------|
| Валунная глина, обычная | 15-62 | 5 000 - 30 000 |
| Валунная глина, с гранитной дресвой | 30-125 | 10 000 - 60 000 |
| Валунная глина, с урансодержащей гранитной дресвой | 125-360 | 10 000 - 200 000 |
| Гравий эскерный | 30-75 | 10 000 - 150 000 |
| Песок | 6-70 | 2 000 - 30 000 |
| Глина | 25-100 | 10 000 - 80 000 |
| Грунты содержащие алунитовые сланцы | 175-2500 | 50 000 > 1 миллион |

Техногенные среды. Радон находится в некоторых сортах нефти. Вследствие того, что радон имеет сходство термодинамических характеристик с пропаном, то при перегонке нефти он накапливается во фракциях, обогащенных пропаном. Отходы при переработке нефти и газа часто содержат радий и его ДПР и являются мощными гамма-излучателями.

В 1983 г. ЕРА установили правила, что средняя плотность потока радона от хвостохранилищ не может превышать 740 Бк/м² с (что в 40 раз больше, чем в среднем из почвы). ППР от угольных шлаков и при сжигание природного газа и угля завершает перечень основных участников выбросов радона в атмосферу.

2. МЕТОДЫ, АППАРАТУРА ИЗМЕРЕНИЙ И МОНИТОРИНГА СИСТЕМЫ РАДОНА И ТОРОНА

2.1 Эманационные методы

Концентрации радона в природных средах слишком низкие для определения их химическими методами, поэтому исключительно используются т.н. активностные концентрации. Содержание радиоактивных газов определяется по интенсивности их радиоактивного излучения. Практический смысл всех эманационных измерений - установление достоверного и статистически значимого уровня активностных концентраций радиоактивных эманаций.

Эманационные измерения – комплекс работ, направленных на определение концентрации или содержания радиоактивных эманаций (радона, торона) в природных средах и воздухе помещений. В зависимости от поставленных целей и характеристик объекта исследования, измерения активностных концентраций производятся различной аппаратурой активного и пассивного способа регистраций, с различным временем экспозиции и способами подсчета.

Процедурной основой любого эманационного метода является перевод эманаций из пробы в измерительную камеру. Он может реализовываться несколькими способами. Наиболее совершенным является вакуумный метод (рис. 6). При вакуумном методе объем эманационной камеры должен быть в 5-10 раз больше объема эталонного раствора или пробы. Разрежение воздуха в камере производится с помощью насоса Камовского, вакуумного или ротационного насоса [5]. Созданный перепад давлений обуславливает извлечение радона из исследуемого объема пробы в эманационную камеру. В случае, если эманационная камера плохо держит разряжение или объем исследуемого раствора пробы соизмерим с объемом камеры, то пользуются циркуляционным методом переведения радона в камеру (рис. 7).

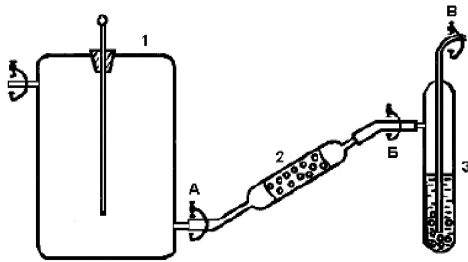


Рис. 6 – Схема введения радона в камеру вакуумным способом: 1 – камера; 2 – осушитель (CaCl_2); 3 – барботер. А, Б, В – зажимы

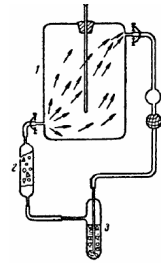


Рис. 7 – Циркуляционная схема введения радона в камеру 1 – камера; 2 – осушитель (CaCl_2); 3 – барботер, 4 – резиновая груша

Регистрация радона. Регистрации радона сцинтилляционным способом подразумевает перевод эманации в ионизационную камеру и подсчет количества импульсов. Наипростейшая сцинтилляционная камера – *ячейка Лукаса* (рис. 8) представляет собой стеклянную вакуумную колбу, покрытую изнутри сцинтиллятором и имеющую хороший оптический контакт с фотоэлектронным умножителем.

Вследствие распада эманации частицы продуктов распада радона взаимодействуют с сцинтиллятором, вызывая оптическую вспышку, которая через ФЭУ попадает на считывающее устройство. Для предотвращения накопления активного налета эманационную камеру выполняют съемной и в процессе регистрации производят периодическую их смену. Существуют проточные сцинтилляционные камеры различной геометрии (полусферические - рис. 9 или цилиндрические - рис. 10, с нижним положением детектора - рис. 10) [5].



Рис. 8 – Простейшая сцинтилляционная камера для измерения концентрации радона (ячейка Лукаса)

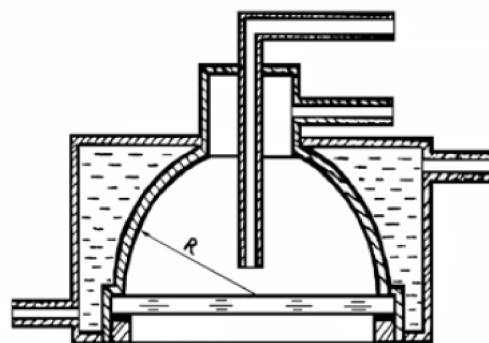


Рис. 9 – Проточная полусферическая сцинтилляционная камера

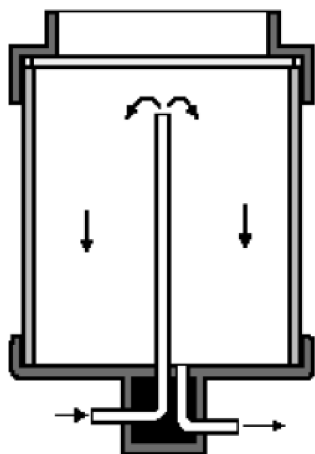


Рис. 10 – Цилиндрическая проточная сцинтилляционная камера для регистрации торона (внутренние стенки покрыты тонким слоем ZnS)

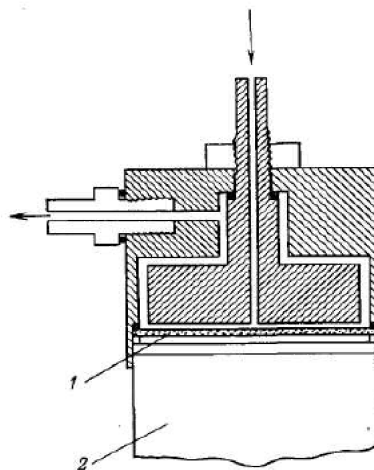


Рис. 11 – Камера для измерения радона-222 сцинтилляционным детектором (1) и фотоумножителем (2)

Вариант камеры в виде ячейки Лукаса с плоским стеклом и сцинтилляционным покрытием ZnS (активированная Tl) реализован в полевом радиометре радона "Радон-М" (рис. 11). Перевод радона в камеру осуществляется с помощью вакуумного насоса. Момент окончания поступления радона в камеру записывают. Задают время измерений в 1, 5 или 20 минут; по окончании которого снимают количество зарегистрированных импульсов и переводят их в объемную концентрацию радона.

Регистрация торона и радона. Для отдельной регистрации радона и торона при их совместном присутствии разработано несколько методов. Во-первых, метод, использующий анализ последовательных дискретных отсчетов при непрерывном измерении проб сцинтилляционным детектором и способ учета совпадений (описаны ниже). К другим методам можно отнести: метод дублированного альфа-трека, метод 2-х фильтров (описаны в соответствующих разделах).

Определение радона (^{222}Rn) и торона (^{220}Rn) при их совместном нахождении подразумевает перевод воздуха, содержащего радон и торон, в эманационную камеру.

Метод требует двух счетных периодов регистрации для каждой пробы.

1) Выполняется одноминутный отсчет в момент ввода

газовой пробы в сцинтилляционную камеру.

2) Выполняются пяти- или десятиминутные отсчеты после начала анализа.

Концентрация радона (^{222}Rn) рассчитывается по второму измерению. В то же время, концентрацию торона (^{220}Rn) рассчитывают по измеренной активности на разных временных периодах. Остаток активности дает концентрацию торона. Ошибка определения торона существенно падает при использовании трех параллельных анализов и увеличивается пропорционально росту концентрации радона [5].

Определение радона и торона методом совпадений. Как известно, торон с периодом 55,6 сек. превращается в полоний-216, который имеет период полураспада 0,15 сек. Оба нуклида являются α -излучателями. Этими обстоятельствами можно воспользоваться для регистрации торона на фоне радона. В простом варианте метода используется обычная сцинтилляционная камера с ФЭУ. Однако здесь с сигнал с ФЭУ поступает на двухканальное устройство. В первом канале регистрируется суммарная скорость счета (радон + торон), а во втором канале регистрируется альфа-альфа совпадения торона и полония-216. Сигнал со второго канала поступает только в том случае, если два акта распада произошли во временном интервале от 0,012 до 0,6 сек. В первом приближении можно полагать, что во втором канале регистрируется исключительно торон. Для уточнения используется калибровка по эталону и специальный математический аппарат. При использовании сцинтилляционной камеры объемом 1,4 л удается надежно регистрировать концентрации и 1 Бк/м³ для радона и торона, соответственно.

Регистрация торона и актинона. Определение количества торона (^{220}Rn) и актинона (^{219}Rn) вследствие малой продолжительности их жизни проводится в проходящей струе воздуха. В большинстве случаев измерения по торону и актинону используются для определения содержания ThX (^{224}Ra) и AcX (^{223}Ra) эманационным методом (рис. 11). Совместное нахождение короткоживущих эманаций в измерительной камере обуславливает этапность измерений и особенностей измерительной схемы: 1) определение оптимальной объемной скорости; 2) определение фона; 3) эталонирование; 4) раздельное

определение торона и актинона.

1. Определение оптимальной объемной скорости. Поскольку величина скорости счёта в эманационной камере при измерении в проходящей струе зависит от скорости движения воздушной струи, то перед измерением эталона и пробы необходимо определить оптимальную объемную скорость. Оптимальная скорость, соответствующая максимальному значению скорости счёта, находится опытным путем [5].

Скорость счёта нелинейно зависит от объемной скорости воздушной струи и может быть представлена формулой:

$$I = aQ_0i \left(e^{-\lambda \frac{V_1}{\omega}} - e^{-\lambda \frac{V_1+V_2}{\omega}} \right) \quad (2.1),$$

где a – доля образующегося радиоактивного газа, который присутствует в воздушной струе; Q_0 – количество радиоактивного газа, выделяемого в единицу времени; i – скорость счёта, создаваемая в детекторе Q_0 количеством радиоактивного газа; λ – постоянная распада; V_1 – объем системы без детектора; V_2 – объем детектора; ω – объемная скорость воздушной струи.

Максимальное значение ионизационного тока будет соответствовать объемной скорости воздушной струи:

$$\omega = \frac{\lambda V_2}{\ln \left(\frac{V_1}{V_1 + V_2} \right)} \quad (2.2),$$

2. Фон определяется при тех же параметрах прокачки, но без пробы.

3. Эталонирование прибора проводится при каждой серии измерений при сохраненных настройках прокачки, но вместо пробы помещается раствор "выдержанных" (более 50 лет с момента приготовления) солей тория [5].

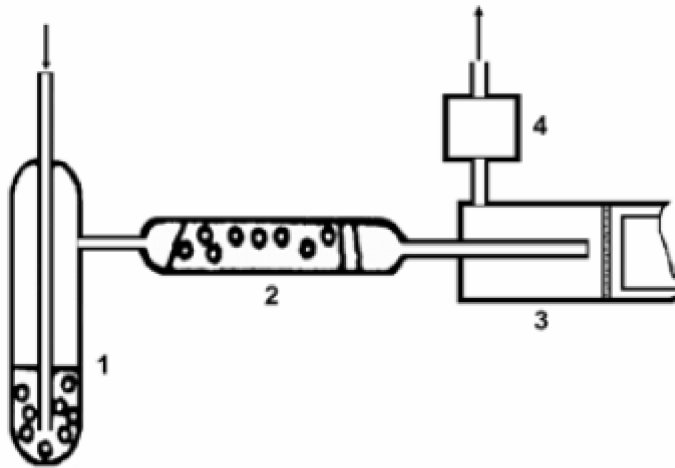


Рис. 12 – Схема проточной установки для измерения торона: 1 – барботер с эталоном или пробой, содержащей ThX (^{224}Ra); 2 – осушитель; 3 – эманационная камера, 4 – реометр

4. После 3-4 минутной прокачки воздуха в измерительной системе устанавливается равномерное распределение торона, тогда и начинается измерение скорости счета.

Содержание ThX (^{224}Ra) можно высчитать из их соотношения [3]:

$$Q_{\text{ThX}} = j \frac{I_s - I_f}{e^{-\lambda_{\text{ThX}} t}} \quad (2.3),$$

где $e^{-\lambda_{\text{ThX}} t}$ – поправка за распад ThX в растворе после отделение ThX от радиотория при переведении пробы в раствор; t – время, прошедшее с момента отделения ThX от радиотория до момента измерения пробы по торону; j – постоянная прибора (цена деления показателя прибора выраженная в граммах тория); I_s , I_f – показания измерения пробы и показания определения фона, соответственно.

Определение содержания AcX (^{223}Ra) по актинону проводится так же как и определение ThX (^{224}Ra) по торону. Разница лишь в объемной скорости воздушной струи, которая в этом случае должна быть в несколько раз больше. В качестве эталона используется раствор равновесного уранового минерала (обычно уранинит или урановая смолка). В равновесном состоянии 1 г урана содержит $2,94 \cdot 10^{-13}$ г AcX (^{223}Ra) [3].

Раздельное определение торона и актинона в проходящей

струе воздуха между камерой и источником смеси радиоактивных газов требует включения в измерительную промежуточного сосуда («картера») такой емкости, чтобы воздух проходил через него приблизительно в течение 1 мин. За это время актинон практически распадается полностью, а торон - только наполовину. Измерение в таких условиях позволяет определить торон в присутствии актинона.

Задача. Анализ четырехкомпонентных проб [12]. При анализе четырехкомпонентных проб все излучение, фиксируемое приборами, должно быть установлено не более чем четырьмя группами радиоактивных элементов. При равновесии в ряду тория, а также между Rn и RnE (или если β -излучение RnE поглощается фильтром) этому требованию удовлетворяют β - и γ -измерения при анализах проб на уран, радон, торий и калий.

Система уравнений, позволяющая определить указанные выше элементы, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} A_1 &= a_1 Q_U + b_1 Q_{Rn} + c_1 Q_{Th} + d_1 Q_K \\ A_2 &= a_2 Q_U + b_2 Q_{Rn} + c_2 Q_{Th} + d_2 Q_K \\ A_3 &= a_3 Q_U + b_3 Q_{Rn} + c_3 Q_{Th} + d_3 Q_K \\ A_4 &= a_4 Q_U + b_4 Q_{Rn} + c_4 Q_{Th} + d_4 Q_K \end{aligned} \quad (2.4)$$

где A_1, A_2, A_3, A_4 – активность пробы по измерениям в четырех различных условиях, выраженных в единицах урано-радиевого эталона, в %; a, b, c, d – эталонные эквиваленты группы урана, радона, тория и калия; Q_U, Q_{Th}, Q_K – содержания в пробе урана, тория и калия в %; Q_{Rn} – содержание в пробе радона, выраженного в единицах урано-радиевого эталона, в %.

Величина Q_{Rn} зависит от коэффициента равновесия между радоном и ураном в урано-радиевом эталоне. Чтобы по ее значению определить содержание в пробе радона в единицах равновесного урана Q_{Rn}^p , пользуются соотношением:

$$Q_{Rn}^p = Q_{Rn} k_{\gamma}^{Rn}, \quad (2.5)$$

где k_{γ}^{Rn} - коэффициент равновесия между радоном и ураном в эталоне.

При описанном способе выражения результатов измерений между эталонными эквивалентами группы урана и радона независимо от коэффициента равновесия в урано-радиевом эталоне для системы уравнений 2.4 всегда имеет место зависимость:

$$a_1 + b_1 = a_2 + b_2 = a_3 + b_3 = a_4 + b_4 = 1 \quad (2.6)$$

Пример.

$$Q_U = \frac{1}{D}(L_1A_1 + M_1A_2 + N_1A_3 + F_1A_4) \quad (2.7)$$

$$Q_{Rn} = \frac{1}{D}(L_2A_1 + M_2A_2 + N_2A_3 + F_2A_4) \quad (2.8)$$

$$Q_{Tn} = \frac{1}{D}(L_3A_1 + M_3A_2 + N_3A_3 + F_3A_4) \quad (2.9)$$

$$Q_K = \frac{1}{D}(L_4A_1 + M_4A_2 + N_4A_3 + F_4A_4) \quad (2.10)$$

где $D=L_1+M_1+N_1+F_1$; $L_1=-n_2c_3+n_3c_2+n_5c_4$; $M_1=n_1c_3-n_3c_1-n_4c_4$; $N_1=-n_1c_2+n_2c_1+n_6c_4$; $F_1=n_4c_2-n_5c_1-n_6c_3$; $L_2=-m_2d_3+m_3d_2+m_5d_4$; $M_2=m_1d_3-m_3d_1-m_4d_4$;

$F_2=m_4d_2-m_5d_1-m_6d_3$; $L_3=n_2-n_3-n_5$; $M_3=-n_1+n_3+n_4$; $N_3=n_1-n_2-n_6$; $F_3=-n_4+n_5+n_6$; $L_4=m_2-m_3-m_5$; $M_4=-m_1+m_3+m_4$; $N_4=m_1-m_2-m_6$; $F_4=-m_4+m_5+m_6$; где $n_1=b_4d_1-d_4b_1$; $n_2=b_4d_2-d_4b_2$; $n_3=b_4d_3-d_4b_3$; $n_4=b_3d_1-d_3b_1$; $n_5=b_3d_2-d_3b_2$; $n_6=b_2d_1-d_2b_1$; $m_1=a_4c_1-c_4a_1$; $m_2=a_4c_2-c_4a_2$; $m_3=a_4c_3-c_4a_3$; $m_4=a_3c_1-c_3a_1$; $m_5=a_3c_2-c_3a_2$; $m_6=a_2c_1-c_2a_1$.

Для расчета урана и радона сумма коэффициентов с соответствующим знаком всегда равен 1:

$$\frac{1}{D}(L_1 + M_1 + N_1 + F_1) = \frac{1}{D}(L_2 + M_2 + N_2 + F_2) = 1 \quad (2.11)$$

Для расчета тория и калия и радона сумма коэффициентов с соответствующим знаком всегда равен 0:

$$(L_3 + M_3 + N_3 + F_3) = (L_4 + M_4 + N_4 + F_4) = 0 \quad (2.12)$$

Для определения коэффициентов L, M, N, F, D рационально применять схему расчета.

Схема расчета формул для анализа результатов измерений четырехкомпонентных проб

| Произведения эталонных эквивалентов | | Разность произведений 1-2 | Произведения разностей на эталонные эквиваленты | |
|-------------------------------------|----------|------------------------------|---|----------|
| 1 | 2 | | 3 | |
| b_4d_1 | d_4b_1 | n_1 | n_1c_3 | n_1c_2 |
| b_4d_2 | d_4b_2 | n_2 | n_2c_1 | n_2c_3 |
| b_4d_3 | d_4b_3 | n_3 | n_3c_2 | n_3c_1 |
| b_3d_1 | d_3b_1 | n_4 | n_4c_2 | n_4c_4 |
| b_3d_2 | d_3b_2 | n_5 | n_5c_4 | n_5c_1 |
| b_2d_1 | d_2b_1 | n_6 | n_6c_4 | n_6c_3 |
| a_4c_1 | c_4a_1 | m_1 | m_1d_3 | m_1d_2 |
| a_4c_2 | c_4a_2 | m_2 | m_2d_1 | m_2d_3 |
| a_4c_3 | c_4a_3 | m_3 | m_3d_2 | m_3d_1 |
| a_3c_1 | c_3a_1 | m_4 | m_4d_2 | m_4d_4 |
| a_3c_2 | c_3a_2 | m_5 | m_5d_4 | m_5d_1 |
| a_2c_1 | c_2a_1 | m_6 | m_6d_4 | m_6d_3 |

Для определения одного из четырех элементов проба должна быть измерена различными способами четыре раза. Однако эти условия

измерения должны быть выбраны таким образом, что отношение эталонных эквивалентов двух элементов в трех уравнениях равны между собой, два других элемента можно определить из этих трех уравнений. В частности, при равенстве отношений эталонных эквивалентов радона и тория в трех уравнениях $b_1:b_2:b_3=c_1:c_2:c_3$ независимо от величины нарушения равновесия в ряду уран и присутствия в пробе тория содержания урана и калия в пробе определяется на основании результатов трех измерений по формулам:

$$Q_U = \frac{1}{D}(L_1A_1 + M_1A_2 + N_1A_3) \quad (2.13)$$

$$Q_K = \frac{1}{D}(L_2A_1 + M_2A_2 + N_2A_3) \quad (2.14)$$

где $D=L_1+M_1+N_1$; $L_1=(d_3b_2- d_2b_3)$; $M_1=(d_1b_3- d_3b_1)$; $N_1=(d_2b_1- d_1b_2)$; $L_2=(b_3- b_2)$; $M_2=(b_1- b_3)$; $N_2=(b_2- b_1)$.

Если при двух измерениях соблюдается равенство отношений эталонных эквивалентов трех элементов, четвертый определяется по данным двух измерений.

Например, при условии $\frac{b_2}{b_1} = \frac{c_2}{c_1} = \frac{d_2}{d_1} = l$ система двух уравнений для определения урана имеет вид:

$$A_1 = a_1Q_U + b_1Q_{Rn} + c_1Q_{Th} + d_1Q_K \quad (2.15)$$

$$A_2 = a_2Q_U + lb_1Q_{Rn} + lc_1Q_{Th} + ld_1Q_K \quad (2.16)$$

При $a_1=1- b_1$, $a_2=1- b_2$ решение системы уравнений *20 относительно урана приводит к формуле

$$Q_U = A_1 + \frac{1}{l-1}(A_1 + A_2) \quad (2.17)$$

Если $l = \frac{a_2}{a_1} = \frac{c_2}{c_1} = \frac{d_2}{d_1}$, то по формуле (2.17) рассчитывают радон.

Таким образом, выражение (2.17) представляет собой обобщенный вариант формулы для определения урана и радона. Чтобы исключить влияние излучения мешающего анализу элемента вместо l у формулу (2.17) подставляют отношение его эталонных эквивалентов; при равенстве отношений эталонных эквивалентов нескольких элементов их влияние на результат анализа одновременно исключается. Равенство отношений эталонных эквивалентов урана, радона и тория или урана, радона и калия на основании $a_1 + b_1 = a_2 + b_2 = a_3 + b_3 = a_4 + b_4 = l$ возможно только в частном случае, когда $a_1=a_2$, $b_1=b_2$, $c_1=c_2$, калий определяют из двух уравнений с четырьмя неизвестными:

$$A_1 = a_1Q_U + b_1Q_{Rn} + c_1Q_{Th} + d_1Q_K \quad (2.18)$$

$$A_2 = a_2Q_U + b_1Q_{Rn} + c_1Q_{Th} + d_2Q_K \quad (2.19)$$

$$\text{Откуда } Q_K = \frac{1}{d_1 - d_2}(A_1 - A_2) \quad (2.20)$$

При условии $a_1=a_2$, $b_1=b_2$, $d_1=d_2$ формула для расчета тория имеет вид:

$$Q_{Th} = \frac{1}{c_1 - c_2} (A_1 - A_2) \quad (2.21)$$

Задача. Анализ трехкомпонентных проб [12]. Трехкомпонентные пробы разделяются на два типа:

- 1) содержащие торий или калий и уран при неопределенном коэффициенте равновесия с радоном;
- 2) содержащие торий, калий и уран при таком же коэффициенте равновесия с радоном, как в эталоне.

Рассмотрим случай 1, для которого система уравнений имеет вид:

$$A_1 = a_1 Q_U + b_1 Q_{Rn} + c'_1 Q' \quad (2.22)$$

$$A_2 = a_2 Q_U + b_2 Q_{Rn} + c'_2 Q' \quad (2.23)$$

$$A_3 = a_3 Q_U + b_3 Q_{Rn} + c'_3 Q' \quad (2.24)$$

где Q' - содержание тория или калия в пробе, %; c' - эталонный эквивалент тория или калия.

Решение системы уравнений приводит к формулам:

$$Q_U = \frac{1}{D} (L_1 A_1 + M_1 A_2 + N_1 A_3) \quad (2.25)$$

$$Q_{Rn} = \frac{1}{D} (L_2 A_1 + M_2 A_2 + N_2 A_3) \quad (2.26)$$

$$Q' = \frac{1}{D} (L_3 A_1 + M_3 A_2 + N_3 A_3) \quad (2.28)$$

где $D=L_1+M_1+N_1$; $L_1=(c'_2 b_3 - c'_3 b_2)$; $M_1=(c'_3 b_1 - c'_1 b_3)$; $N_1=(c'_1 b_2 - c'_2 b_1)$;
 $L_2=(c'_3 - c'_1) + (c'_2 b_3 - c'_3 b_2)$; $M_2=(c'_1 - c'_3) + (c'_3 b_1 - c'_1 b_3)$; $N_2=(c'_2 - c'_1) + (c'_1 b_2 - c'_2 b_1)$;
 $L_3=(b_2 - b_3)$; $M_3=(b_3 - b_1)$; $N_3=(b_1 - b_2)$.

Если выполняется условие $\frac{b_2}{b_1} = \frac{c'_2}{c'_1} = l$ или $\frac{a_2}{a_1} = \frac{c'_2}{c'_1} = l$ уран или радон в пробах первого типа рассчитывают по данным двух измерений.

Задача. Анализ двухкомпонентных проб [12]. Двухкомпонентный пробы разделяются на несколько типов:

- 1) урановые с неопределенным коэффициентом равновесия между радоном и ураном;
- 2) урано-ториевые или урано-калиевые с таким же коэффициентом равновесия между радоном и ураном, как в эталоне.

Для урановых проб система уравнений имеет вид:

$$A_1 = a_1 Q_U + b_1 Q_{Rn} \quad (2.29)$$

$$A_2 = a_2 Q_U + b_2 Q_{Rn} \quad (2.30)$$

Решение этих уравнений относительно урана и радона приводит к формуле *21. При $\frac{b_2}{b_1} = l$ определяется уран, а при $\frac{a_2}{a_1} = l$ - радон. Здесь l – отношение эталонных эквивалентов элемента, мешающего анализу.

Если эталон не содержит определяемого элемента (например, при измерении проб третьего типа с урано-радиевым эталоном), система уравнений и соответствующие формулы для расчета содержания тория и калия имеет следующий вид:

$$A_1 = c_1 Q_{Th} + d_1 Q_K \quad (2.31)$$

$$A_2 = c_2 Q_{Th} + d_2 Q_K \quad (2.32)$$

$$Q_{Th} = \frac{d_2 A_1 - d_1 A_2}{d_2 c_1 - d_1 c_2} \quad (2.33)$$

$$Q_K = \frac{c_1 A_2 - c_2 A_1}{d_2 c_1 - d_1 c_2} \quad (2.34)$$

Аналогичный вид имеют формулы для расчета содержания урана и радон, при анализе урано-радиевых проб пользоваться ториевым эталоном.

Задача. Определение погрешности анализа на уран [12]. При анализе многокомпонентных проб основное необходимое условие заключается в том, чтобы количество независимых уравнений, которое можно составить по результатам измерений пробы в различных условиях, было равно количеству измеряемых компонентов.

При выборе рационального комплекса измерений многокомпонентных проб следует предварительно оценить возможные погрешности анализов, обусловленные радиологическими особенностями проб.

При расчете урана по формуле *21, в результаты анализа могут вноситься погрешности, обусловленные влиянием тория, калия, нарушением радиоактивного равновесия между радоном и ураном и между радоном и RaE (группой RaD).

Первые три погрешности возникают, когда коэффициент в формуле (2.17) отличается от отношения эталонных эквивалентов тория, калия и радона соответственно. Ошибка в связи с влиянием RaE возможна в случае, когда коэффициенты равновесия между радоном и RaE в пробах и эталоне различаются, а влиянием бета-излучения RaE пренебречь нельзя. Эталонный эквивалент v группы радия D при этом равен:

$$v = l - (a + b) \quad (2.35)$$

Абсолютную величину указанных погрешностей оценивают по следующим формулам:

$$\Delta Q_U^{Th} = \frac{l - l_{Th}}{l - 1} c_1 Q_{Th}^n \quad (2.36)$$

$$\Delta Q_U^K = \frac{l - l_K}{l - 1} d_1 Q_K^n \quad (2.37)$$

$$\Delta Q_U^{Rn} = \frac{l - l_{Rn}}{l - 1} \left(\frac{k_{II}^{Rn} - 1}{k_{\text{Э}}^{Rn} - 1} \right) b_1 Q_U^{II} \quad (2.38)$$

$$\Delta Q_U^{RaE} = \frac{l}{l - 1} \left(\frac{k_{II}^{RnE}}{k_{\text{Э}}^{RnE}} - \frac{k_{II}^{Rn}}{k_{\text{Э}}^{Rn}} \right) v_1 Q_U^{II}, \quad (2.39)$$

где ΔQ_U^{Th} , ΔQ_U^K , ΔQ_U^{Rn} , ΔQ_U^{RaE} - абсолютные ошибки анализа на уран, обусловленные соответственно влиянием тория, калия и нарушением равновесия между радоном и ураном и неопределенным содержанием RaE в пробе; l - коэффициент, принятый в формуле (2.17); l_{Th} , l_K , l_{Rn} - отношение эталонных эквивалентов тория, калия и радона в данных условиях измерений; k_{II}^{Rn} , $k_{\text{Э}}^{Rn}$, k_{II}^{RnE} , $k_{\text{Э}}^{RnE}$ - коэффициенты равновесия между радоном и ураном и RaE и ураном в пробе и эталоне.

Если радий, радон и RaE в естественных условиях залегания находятся в равновесии, а затем равновесие с радоном нарушается вследствие эманирования пробы после ее дробления, погрешность анализа, обусловленная эманированием пробы, оценивается по формуле

$$\Delta Q_U^{\alpha} = \frac{l}{l - 1} \left(\frac{\alpha_{II} - \alpha_{\text{Э}}}{1 - \alpha_{\text{Э}}} \right) \left(\frac{k_{II}^{Ra}}{k_{\text{Э}}^{Ra}} \right) v_1 Q_U \quad (2.40)$$

где α_{II} , $\alpha_{\text{Э}}$ - коэффициенты эманирования пробы и эталона в относительных единицах; k_{II}^{Ra} , $k_{\text{Э}}^{Ra}$ - коэффициенты равновесия радия с ураном в пробе и эталоне.

При $l = l_{Rn} = l_{Th} = l_K$ полностью исключаются погрешности анализа на уран, обусловленные излучением тория, калия и нарушением равновесия между радоном и ураном.

При $\alpha_{II} = \alpha_{\text{Э}}$, или $v = 0$ исключаются погрешности, связанные с неопределенным содержанием RaE в пробе.

Если $1 < l < l_{Rn}$, то при избытке радона $\frac{k_{II}^{Rn}}{k_{\text{Э}}^{Rn}} > 1$ результаты определения урана занижаются, а при недостатке – завышаются.

Когда $1 < l > l_{Rn}$, погрешности анализа меняют знак.

Задача. Определение погрешности анализа на радон [12]. Если коэффициент l - коэффициент, принятый в формуле *21, отличается от отношения урановых эталонных эквивалентов $l_U = \frac{a_2}{a_1}$, абсолютную погрешность анализа на радон ΔQ_{Rn}^U , обусловленную нарушением равновесия между радоном и ураном в пробе, оценивают по выражению

$$\Delta Q_{Rn}^U = \frac{l - l_U}{l - 1} \left(\frac{k_{\text{Э}}^{Rn}}{k_{II}^{Rn}} - 1 \right) a_1 Q_{Rn} \quad (2.42)$$

Поскольку $Q_{Rn} = Q_U \left(\frac{k_{II}^{Rn}}{k_{\text{Э}}^{Rn}} \right)$, эту погрешность можно определить также по формуле:

$$\Delta Q_{Rn}^U = \frac{l - l_U}{l - 1} \left(1 - \frac{k_{II}^{Rn}}{k_{\text{Э}}^{Rn}} \right) a_1 Q_U \quad (2.43)$$

В частности, при определении радона на основании измерения бета-гамма-излучения проб гамма-эквивалент урановой группы a_γ в связи с его малой величиной (0,02-0,05) обычно принимают равным нулю. При этом условии $l = \frac{a_\gamma}{a_1} = 0$, и радон, как это следует из формулы *21, определяют по одному гамма-излучению:

$$Q_{Rn} = A_1 + \frac{1}{0 - 1} (A_1 - A_\gamma) = A_\gamma, \quad (2.44)$$

где A_γ - результат гамма-измерений пробы в % урана.

Возникающая с этим погрешность (при $l = 0$, $l_U = \frac{a_\gamma}{a_1}$) составляет величину:

$$\Delta Q_{Rn}^U = \left(\frac{k_{\text{Э}}^{Rn}}{k_{II}^{Rn}} - 1 \right) a_\gamma Q_{Rn} \quad (2.45)$$

$$\Delta Q_{Rn}^U = \left(1 - \frac{k_{II}^{Rn}}{k_{\text{Э}}^{Rn}} \right) a_\gamma Q_U \quad (2.46)$$

Из формул следует, что при $\frac{k_{II}^{Rn}}{k_{\text{Э}}^{Rn}} > 1$ результат анализа пробы на радон оказывается заниженным. Максимальное занижение, равное $a_\gamma Q_{Rn}$ имеет место при отсутствии в пробе урана, та как в этом случае $\frac{k_{\text{Э}}^{Rn}}{k_{II}^{Rn}} = 0$.

При $\frac{k_{II}^{Rn}}{k_{\text{Э}}^{Rn}} < 1$ содержание радона в пробе завышается, причем максимальное завышение, равное $a_\gamma Q_{Rn}$, возникает при отсутствии в пробе радона, поскольку при этом $\frac{k_{II}^{Rn}}{k_{\text{Э}}^{Rn}} = 0$.

При $a_\gamma \leq 0,02 - 0,05$, учитывая влияние гамма-излучения элементов группы урана следует только при анализах проб, у которых отмечается резкий сдвиг равновесия в сторону недостатка радона $k_{II}^{Rn} \leq 0,3 - 0,4$.

Задача. Определение погрешности анализа на торий и калий [12]. Величина абсолютных ошибок при определении тория и калия, в свяи с

неустраненными влияниями групп радиоактивных элементов, мешающих анализу, оценивают из следующих выражений:

$$\Delta Q_{Th}^{Rn} = \frac{b_1 - b_2}{c_1 - c_2} \left(\frac{k_{II}^{Rn} - 1}{k_{\text{Э}}^{Rn} - 1} \right) Q_U \quad (2.47)$$

$$\Delta Q_{Th}^K = \frac{d_1 - d_2}{c_1 - c_2} Q_K \quad (2.48)$$

$$\Delta Q_K^{Rn} = \frac{b_1 - b_2}{d_1 - d_2} \left(\frac{k_{II}^{Rn} - 1}{k_{\text{Э}}^{Rn} - 1} \right) Q_U \quad (2.49)$$

$$\Delta Q_K^{Th} = \frac{c_1 - c_2}{d_1 - d_2} Q_{Th}, \quad (2.50)$$

где ΔQ_{Th}^{Rn} , ΔQ_K^{Rn} - абсолютные погрешности анализа соответственно на торий и калий, обусловленные нарушением в пробах равновесия между радоном и ураном; ΔQ_{Th}^K - абсолютная погрешность анализа на торий, обусловленная влиянием калия; ΔQ_K^{Th} - абсолютная погрешность анализа на калий, обусловленная влиянием тория.

При $\frac{k_{II}^{Rn}}{k_{\text{Э}}^{Rn}} < 1$, $b_1 > b_2$, $c_1 > c_2$, $d_1 > d_2$ результаты анализов на торий и калий занижаются, а при $\frac{k_{II}^{Rn}}{k_{\text{Э}}^{Rn}} > 1$ - завышаются.

При измерениях проб с равновесным урановым эталоном и расчетах абсолютная погрешность анализа на калий, обусловленная нарушением равновесия между ураном, радоном и RaE (при равновесии между RaE и радием), оценивается по выражению

$$\Delta Q_K^{Rn, RaE} = \frac{Q_U}{d_1 - d_2} \left[(a_1 - a_2)(1 - k_{II}^{Rn}) + (v_1 - v_2)(k_{II}^{Rn} - k_{\text{Э}}^{Rn}) \right] \quad (2.51)$$

Пример 1. Для расчета содержания урана, радона, тория и калия в пробах по скоростям счета вычисляют активность пробы в единицах урано-радиевого эталона и подставляют значения активностей в соответствующие расчетные формулы.

Требуется рассчитать содержание радиоактивных элементов в пробе при измерениях ее с эталоном, содержащим 0,01% урана. Коэффициент равновесия между радоном и ураном в эталоне составляет 87%, вес эталона при гамма-измерениях равен 420 г, а пробы 400 г. Измерение суммарного бета-гамма-излучения проб осуществляется в шести кюветах; в таких же условиях измеряется эталон; навески проб и эталонов одинаковы.

Результаты измерений эталонов

| Показатели | Эталоны | | | |
|-------------------------|----------------|--------------------|---|-------|
| | Урано-радиевый | Окиси-закуси урана | тория | калия |
| Вес, г | 420 | 420 | 400 | 380 |
| Содержание, % | 0,01 | 0,03 | 0,060 Th /0,003 ^U | 52,5 |
| Скорость счета, имп/мин | 6000 | 360 | 15300 | 3260 |

Скорость счета с вычетом фона, имп/мин

| Объект измерений | Суммарного бета-гамма излучения, зарегистрированного газоразрядными счетчиками | | Гамма-излучения, зарегистрированного сцинтилляционным счетчиком | |
|------------------|--|------|---|---------------------------------|
| | СТС | МС | общего | в участке спектра 0,22-0,26 МэВ |
| Эталон | 1000 | 4500 | 6000 | 550 |
| Проба | 482 | 1320 | 1580 | 170 |

Активность пробы в единицах эталона составляет:

$$A_{СТС} = \frac{482}{1000} 0,01 = 4,82 \cdot 10^{-3}\% \quad (2.52)$$

$$A_{МС} = \frac{1320}{4500} 0,01 = 2,93 \cdot 10^{-3}\% \quad (2.53)$$

$$A_{\gamma} = \frac{1580}{6000} \frac{420}{400} 0,01 = 2,77 \cdot 10^{-3}\% \quad (2.54)$$

$$A_{0,24} = \frac{170}{550} \frac{420}{400} 0,01 = 3,24 \cdot 10^{-3}\% \quad (2.55)$$

После подстановке значения $A_{СТС}$ и $A_{МС}$ определим содержание калия:

$$Q_K = 0,262 \cdot 10^4 \cdot 10^{-3} \cdot (4,82 - 2,93) = 4,95\%$$

Если коэффициенты равновесия между радоном и ураном в пробе и эталоне одинаковы, содержание тория можно определить по формуле:

$$Q_{Th} = 10^{-3} \cdot (2,27 \cdot 2,77 + 2,03 \cdot 4,82 - 7,3 \cdot 2,93) = 3,0 \cdot 10^{-3}\%$$

При неопределенном коэффициенте равновесия между радоном и ураном содержание тория следует

$$Q_{Th} = 4,35 \cdot 10^{-3} \cdot (3,24 - 2,77) + 0,505 \cdot 10^{-3} (4,82 - 2,93) = 3,0 \cdot 10^{-3}\%$$

В тех пробах, где равновесие в ряду урана нарушено, радоно определяют по выражению:

$$Q_{Rn} = 10^{-3} \cdot (2,77 - 0,43 - 1,15 \cdot 0,495) = 1,0 \cdot 10^{-3}\%$$

Поскольку коэффициент равновесия между радоном и ураном в эталоне равен 87%, содержание радона в пробе (в единицах равновесного урана) составит

$$Q_{Rn}'' = 1,0 \cdot 10^{-3} \cdot 0,87 = 0,870 \cdot 10^{-3}\%,$$

а коэффициент равновесия

$$k_{II}^{Rn} = \frac{0,87 \cdot 10^{-3}}{1,0 \cdot 10^{-3}} 100 = 87\% .$$

Пример 2. Стабильность чувствительности при измерениях общего бета-гамма-излучения дает возможность упростить расчеты, т.к. позволяет выразить результаты измерений проб при расчете содержания радиоактивных элементов по соответствующим формулам непосредственно в скоростях счета:

$$A_{MC} = \frac{I_{II}^{MC}}{I_{\text{Э}}^{MC}} Q_U^{\text{Э}} \quad (2.56)$$

$$A_{CTC} = \frac{I_{II}^{CTC}}{I_{\text{Э}}^{CTC}} Q_U^{\text{Э}} \quad (2.57)$$

$$A_{\gamma} = \frac{I_{II}^{\gamma} P_{\text{Э}}}{I_{\text{Э}}^{\gamma} P_{II}} Q_U^{\text{Э}} \quad (2.58)$$

$$A_{\gamma} = \frac{I_{II}^{0,240} P_{\text{Э}}}{I_{\text{Э}}^{0,240} P_{II}} Q_U^{\text{Э}} \quad (2.59)$$

При измерений проб в 6 кюветах используя результаты измерений эталонов получаем:

$$A_{MC} = \frac{1}{4,5} \cdot 10^{-5} I_{II}^{MC} \quad (2.59)$$

$$A_{CTC} = 1,0 \cdot 10^{-5} I_{II}^{CTC} \quad (2.60)$$

$$A_{\gamma} = \frac{1}{6} \cdot 10^{-5} \frac{P_{\text{Э}}}{P_{II}} I_{II}^{\gamma} \quad (2.61)$$

$$A_{\gamma} = \frac{1}{5,5} \cdot 10^{-4} \frac{P_{\text{Э}}}{P_{II}} I_{II}^{0,240} \quad (2.62)$$

После подстановки соответствующих значений A_{CTC} , A_{MC} , A_{γ} имеем:

$$Q_K = 0,262 \cdot (I_{II}^{CTC} - 0,2222 \cdot I_{II}^{MC}) \quad (2.63)$$

$$Q_U = 10^{-5} \cdot \left(0,715 \cdot I_{II}^{MC} - 0,185 \cdot I_{II}^{\gamma} \cdot \frac{P_{\text{Э}}}{P_{II}} - 1,11 \cdot I_{II}^{CTC} \right) \quad (2.64)$$

$$Q_{Th} = 10^{-5} \cdot \left(0,083 \cdot I_{II}^{\gamma} \cdot \frac{P_{\text{Э}}}{P_{II}} + 2,03 \cdot I_{II}^{CTC} - 1,62 \cdot I_{II}^{MC} \right). \quad (2.65)$$

При неопределенном коэффициенте равновесия между радоном и ураном в формулы для расчета содержания тория и радона входят результаты измерений в дифференциальном участке спектра.

$$Q_{Th} = 10^{-5} \cdot \left((7,900 \cdot I_{II}^{0,240} - 0,725 \cdot I_{II}^{\gamma}) \cdot \frac{P_{\text{Э}}}{P_{II}} + 0,515 \cdot I_{II}^{CTC} - 0,114 \cdot I_{II}^{MC} \right). \quad (2.66)$$

$$Q_{Rn} = 10^{-5} \cdot \left((0,471 \cdot I_{II}^{\gamma} - 3,24 \cdot I_{II}^{0,240}) \cdot \frac{P_{\text{Э}}}{P_{II}} + 0,1 \cdot I_{II}^{MC} - 0,5 \cdot I_{II}^{CTC} \right) \quad (2.67)$$

Задача. Определение радия и коэффициента эманирования по гамма-излучению [12]. Увеличение интенсивности γ -излучения герметизированной эманлирующей пробы по мере накопления радона используют для определения радия и коэффициента эманирования. Измерения обычно выполняют с помощью сцинтилляционного γ -счетчика. Интенсивность гамма-излучения выражают в % урана. Урано-радиевый эталон герметизируем не менее чем за 30 суток до измерений.

Пробы для анализа помещают в специальные контейнеры из алюминия и стекла объемом от 10 до 500 см³ (в зависимости от активности проб), удобные для герметизации.

При измерениях пробы и эталон должны заполнять весь объем контейнера и отличаться по весу не более чем на 10%.

Пробу измеряю в течении 2-3 суток не менее трех раз (через день); первое измерение выполняют до герметизации (или сразу после герметизации) предварительно дезаманированной пробы.

Формула для расчета радия имеет вид:

$$Q_{Ra}^{II} = \left(A' - \alpha_{\gamma} Q_U - c_{\gamma} Q_{Th} + d_{\gamma} Q_K + \frac{A'' + A'}{1 - e^{-\lambda t}} \right) \frac{k_{\text{Э}}^{Rn}}{1 - \alpha_{\gamma}}, \quad (2.68)$$

где Q_{Ra}^{II} - содержание радия в пробе в % равновесного урана; A' , A'' - результаты измерений γ -активности герметизированной пробы для двух моментов времени в %-эквивалентного урана; t - время между измерениями; Q_U , Q_{Th} , Q_K - содержание урана, тория и калия в пробе в %; λ - постоянная распада радона; α_{γ} , c_{γ} , d_{γ} - эталонные γ -эквиваленты элементов урановой группы, тория и калия; $k_{\text{Э}}^{Rn}$ - коэффициент равновесия между радоном и ураном в эталоне.

Если в пробе содержится относительно мало тория и калия ($Q_{Th}=Q_K=0$) имеем:

$$Q_{Ra}^{II} = \left(A' - \alpha_{\gamma} Q_U + \frac{A'' + A'}{1 - e^{-\lambda t}} \right) \frac{k_{\text{Э}}^{Rn}}{1 - \alpha_{\gamma}}. \quad (2.69)$$

Если, кроме того, уран в эталоне находится в равновесии с радием и влиянием гамма-излучения урановой группы можно пренебречь, то выражение для расчета концентрации радия становится более простым:

$$Q_{Ra}^{II} = A' + \frac{A'' + A'}{1 - e^{-\lambda t}} \quad (2.70)$$

При расчете содержания радия по последней формуле погрешность анализа, обусловленная влиянием гамма-излучением элементов урановой группы, равна:

$$\Delta Q_{Ra}^U = (Q_U - Q_{Ra})\alpha_\gamma, \quad (2.71)$$

где Q_U - содержание в пробе урана, в %; Q_{Ra} - содержание в пробе радия в % равновесного урана.

Максимальная абсолютная погрешность анализа на радий при расчетах возникает при отсутствии в пробе урана или радия. Когда в пробе нет радия, результат анализа завышается $\alpha_\gamma Q_U$, а при отсутствии в пробе урана занижается на $\alpha_\gamma Q_{Ra}$. Поскольку гамма-эквивалент урановой группы α_γ обычно не превышает 0,02-0,04, указанная погрешность имеет практическое значение только при анализе проб с резким недостатком радия $k_{II}^{Rn} \leq 30-40\%$.

Результат анализа на радий рассчитывают на среднее арифметическое из всех вариантов подстановок A^I и A^{II} в формулу анализа. Если результат какого-либо из расчетов резко отличается от остальных, герметизированную пробу измеряют через сутки.

Попутно с определением радия рассчитывают коэффициент равновесия между ураном и радоном, с одной стороны, и радием - с другой, а также коэффициент эманирования:

$$k_{II}^{Ra} = \frac{Q_{Ra}^{II}}{Q_U} \quad (2.72)$$

$$k_{II}^{Rn} = \frac{Q_{Ra}^{II}}{Q_U} \quad (2.73)$$

$$\alpha_{II} = \frac{Q_{Ra}^p - Q_{Rm}^p}{Q_{Ra}^p} \quad (2.74)$$

Содержание в пробе радона (в единицах равновесного урана) рассчитывают:

$$Q_{Rn}^p = A_{\gamma 0} k_{\text{Э}}^{Rn} \quad (2.75)$$

где $A_{\gamma 0}$ - результат γ -измерений пробы до ее герметизации в % урана; $k_{\text{Э}}^{Rn}$ - коэффициент равновесия радона с ураном в эталоне.

Пример. Результаты γ -измерений герметизированной пробы и расчет содержания радия

| Время от момента запайки | Гамма-активность пробы, % | Содержание радия в пробе, % равновесного урана | | | | |
|--------------------------|---------------------------|--|---|---|---|---|
| | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| | | | | | | |

| пробы, сутки | равновесного урана | | | | | |
|-----------------|-----------------------|-------|-------|-------|----------|-------|
| 0 | 0,023 | - | - | - | - | - |
| 1 | 0,025 | 0,035 | - | - | - | - |
| 2 | 0,027 | 0,036 | 0,037 | - | - | - |
| 3 | 0,028 | 0,035 | 0,035 | 0,038 | - | - |
| 4 | 0,027 | 0,031 | 0,03 | 0,027 | Не расч. | - |
| 5 | 0,031 | 0,036 | 0,037 | 0,036 | 0,038 | 0,050 |

При измерении на четвертые сутки отмечается значительная погрешность, поэтому все варианты с учетом этого варианта следует отбраковать.

После исключения всех результатов расчета, включающих измерения на четвертые сутки, содержание радия в % равновесного урана равно 0,036%, содержание радона A_{70} , равно 0,023%, а коэффициент эманирования

$$\alpha_{II} = \frac{0,036 - 0,023}{0,036} = 0,36$$

При измерениях рационально придерживаются следующего порядка работы: партию в 30-40 проб помещаю в банки и выполняю первое измерение. Затем пробы герметизируют и в течении каждых последующих двух суток производят измерения; после этого рассчитывают результаты анализов. Таким образом, содержание радия и коэффициент эманирования могут быть определены через день после поступления пробы на измерение. Если увеличить интервал времени между измерениями или количество измерений, точность анализа повышается.

Например, можно сначала измерить и герметизовать одну партию в 30-40 проб, а на следующий день - другую. В следующие четыре дня в том же порядке следует произвести еще два измерения каждой партии проб. При такой последовательности в работе находится 60-80 проб и результаты анализов выдаются на пятые сутки после первого измерения. В этом случае производительность работ сохраняется, а интервал времени между измерениями проб одной партии увеличивается в 2 раза.

Если определять радий по накоплению радона в прокаленных пробах, необходимость в их герметизации в большинстве случаев отпадает, так как после прокаливания при 1000 °С большинство проб практически перестает эманировать.

2.2 Спектрометрический метод определения концентрации радона (α -метод)

Для регистрации α -частиц используют интегральные ионизационные камеры с электрометром, импульсные

ионизационные камеры, а также сцинтилляционные камеры и счетчики [19]. Объектом лабораторного исследования являются пробы почв или горных пород (рис. 13).

Порошковую пробу, измельченную до 30-40 мкм, насыпают на тарелочку (кассету) слоем около 1 мм и помещают внутрь ионизационной камеры, а при использовании сцинтилляционного счетчика - в светонепроницаемую камеру под сцинтиллятором на строго фиксированном расстоянии от него. Перед этим проводят компенсацию фона или измеряют его величину. Измерив интенсивность излучения образца и эталона, рассчитывают концентрацию радиоактивных элементов в эквивалентных единицах равновесного урана. На точность α -метода оказывает влияние различное соотношение плотностей активного вещества и вмещающей породы в пробе и эталоне, степень измельчения и влажность породы, эманирование пробы в процессе измерений.

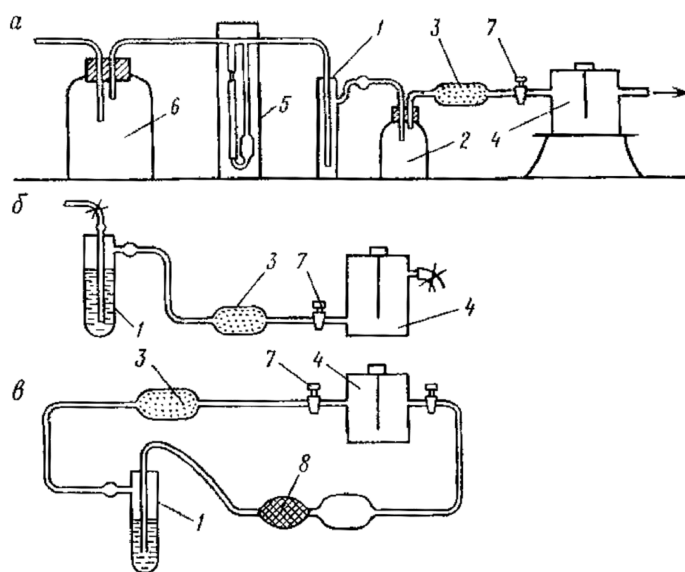


Рис. 13 – Схема определения торона (а) и радона (б)

Способы введения эманаций в камеру: б – вакуумный, в – циркуляционный; 1 – барботер с исследуемым раствором, 2 – промывалка, 3 – осушитель; 4 – эманационная камера; 5 – реометр; 6 – балластный сосуд; 7 - соединительный кран; 8 – резиновая груша.

Влияние первого фактора устраняют применением эталонов из характерной пробы исследуемой серии. Влияние эманирования пробы обусловлено тем, что эффективность регистрации

излучения эманаций, выходящих из образца и распадающихся в объеме камеры, гораздо больше чем вероятность регистрации α -частиц, возникающих внутри образца. Влияние эманаций особенно сильно для ториевых руд, так как короткоживущий продукт распада тория - торон успевает накопиться в количествах, соответствующих радиоактивному равновесию. Для учета влияния эманаций проводят измерения при разной толщине h пробы. С увеличением толщины слоя ионизационный ток растет, так как возрастает количество эманацирующей породы. По результатам измерений строят график зависимости $I=f(h)$ и экстраполяции его до $h=0$ находят значение $I_{n.o.}$, свободное от влияния эманации. Влияние влажности пробы и степень ее измельчения учесть значительно труднее.

В течении некоторого времени после помещения образца в камеру наблюдается рост показаний прибора из-за накопления эманаций, причем скорость роста определяется периодом полураспада эманаций. На этом основано использование α -метода для определения природы радиоактивности. Для пробы с торием показания растут в течении 6-7 мин (6-8 периодов полураспада торона), а для пробы с ураном - 25-30 с (период полураспада актинона 3,9 с, а влияние радона из-за его большого периода полураспада вовсе не чувствуется).

Для раздельного определения содержания отдельных α -излучателей с помощью импульсной ионизационной камеры изучают α -спектры в тонких слоях.

Концентрацию радона в кюри на литр в пробе газа при вакуумном способе введения радона в камеру рассчитывают по формуле:

$$Q_{Rn} = \frac{Q_{Ra}(1 - e^{-\lambda t})(I_s - I_{f1})}{(I_e - I_{f2})V} \quad (2.76)$$

где Q_{Ra} – содержание радия в эталоне (эталонном служит жидкий раствор соли радия); λ - постоянная распада радона; t - время накопления радона из радия в эталоне; I_e и I_s - ионизационный ток от эталона и пробы, соответственно; I_{f1} - среднеарифметическое значение натурального рассеяния (перед измерением пробы и после него); I_{f2} - среднеарифметическое значение натурального рассеяния (перед измерением эталона и после него); V - объем

взятой жидкости или объем эманационной камеры.

Если при эталонировании прибора также применялся циркуляционный метод, то содержание радона в исследуемой пробе выражается так:

$$Q_{Rn} = Q_{Ra} \frac{I_s V_2 - V_3 + V_1 + V_4 + \alpha V_3}{I_e V - V_0 + V_1 + V_4 + \alpha_0 V_0} \quad (2.77)$$

де Q_{Ra} - содержание радия в эталоне; V - объем барботера с эталоном; V_0 - объем жидкого эталона; α_0 - коэффициент растворимости радона в жидкости эталона.

Практически при циркуляционной схеме перевода радона в раствор при эталонировании и измерении пробы добиваются постоянства объемов. В этом случае исключается необходимость вводить поправку на объем.

2.3 Радиохимический метод

Для определения содержания изотопов радия обычно использует регистрацию α -излучения их эманаций. Весь радий и его изотопы, содержащиеся в образце, предварительно переводят в растворимое состояние с помощью специальных химических реакций. Для выделения радия из раствора используют способ соосаждения с кристаллическими осадками $BaSO_4$. Осадок сернокислого бария, несущего в себе и сернокислый радий, получают добавлением хлористого бария в пробу при его сплавлении, а после фильтрации образовавшегося раствора - серной кислоты. Выпавший осадок фильтруют, промывают и путем сплавления его с содой и последующего растворения в соляной кислоте переводят в раствор хлористого бария, несущий в себе также радий и его изотопы в виде хлористого радия. Этот раствор, помещаемый в барботер, и является объектом дальнейшего изучения. Из-за малого периода полураспада ThX (^{224}Ra) определение его концентрации в растворе по активности образующего торона проводят в первую очередь.

С учетом малого периода полураспада торона (54,6 с) измерение его активности проводят при непрерывной продувке через камеру воздушной струи, прошедшей перед этим через барботер с исследуемым раствором и увлекающей с собой

образующийся в нем торон. Для этого используют установку, приведенную на рис.12а. Торон, непрерывно образующийся в барботере 1, увлекается воздушным потоком, создаваемым воздуходувкой или грушей, и последовательно проходит через дополнительный объем (промывалку) 2, сушилку 3 и ионизационную (или сцинтилляционную) камеру 4. Промывалка 2 настолько удлиняет время прохождения струи из барботера в камеру 4, что короткоживущий актион ($T=3,93$ с) за это время практически полностью распадается. Реометр 5 контролирует постоянство скорости воздушной струи, а балластный сосуд, включенный непосредственно после воздуходувки, сглаживает пульсацию потока.

Показания камеры зависят от объемов камеры и системы между пробой и камерой, а также от скорости потока. С учетом этого при исследовании с пробой и эталонным раствором необходимо добиваться одной и той же объемной скорости потока. Должны быть одинаковы и другие условия измерений, например, размер барботера и объем раствора. Эталон равновесной соли тория для эманационных определений торона готовят растворением равновесных ториевых минералов и выпускают в запаянных ампулах.

Определение содержание ThX (Ra-224) по формуле:

$$N_n = I_n(N_3/I_3) \quad (2.78)$$

Содержание ThX в образце пересчитывают на момент отделения осадка $BaSO_4$ с помощью основного закона радиоактивного распада. Этой поправкой можно пренебречь, если измерения проведены в течении 2-3 ч после отделения осадка с радием. Так как период полураспада самого долгоживущего продукта распада тория (MsThI - радий-228) мал (6,7 лет), в ториевом ряду в природе почти наверняка существует равновесие и потому содержание ThX можно использовать для расчета Th. Чувствительность метода при использовании высокочувствительных сцинтилляционных камер не менее 10^{-5} г Th.

2.4 Трековые методы

Радиографический метод. Существует ряд методов

регистрации радиоактивного излучения, основанного на анализе следов их взаимодействия с твердыми веществами. В геологии уже сравнительно давно для качественного и количественного определения радиоактивности горных пород и минералов используется *метод радиографии*.

Методом микроавтордиографии можно обнаружить и оценить радиоактивность минеральных зерен размером примерно $0,01 \text{ мм}^2$, эквивалентную $0,1\%$ урана [5].

Радиографический метод подразумевает изучение эффектов взаимодействия радиоактивного излучения с твердым веществом (минералы, фотографические эмульсии). В частности, в прозрачных, бесцветных или слабоокрашенных зернах минералов под длительным воздействием радиоактивности образуются плеохроичные ореолы (или плеохроичные "дворики") - окрашенные зоны, возникающие вокруг мелких включений радиоактивных акцессорных минералов (циркона, пироклора, монацита и др.) других минералов.

В противоположность этому природному эффекту разработали обычную, или контрастную, радиографию и следовую, или микроавтордиографию.

Если на плоскую полированную поверхность горной породы положить эмульсионный слой фотографической пленки, то радиоактивное воздействие на нее образует изображение, которое отвечает распределению радиоактивных элементов в породе. Степень потемнения фоточувствительного слоя зависит от интенсивности радиоактивного излучения [19].

Вариант радиографического метода - следовая радиография (α -радиография), которая заключается в подсчете под микроскопом числа треков α -частиц и измерение их длины. Ее преимущество - высокая чувствительность и возможность количественно ценить интенсивность радиоактивности.

Для микроавтордиографии применяют специальные фотопленки с толстой (до 100 мкм и более) высокочувствительной и микрозернистой (менее $0,2 - 0,3 \text{ мкм}$) "ядерной" эмульсией. Высокая концентрация бромистого серебра в фотоэмульсии и большая толщина делает его малочувствительным к β - и γ -излучению. В то же время они позволяют фиксировать α -частицы

различных энергий (они различаются по величине пробегов R).

Микрорадиография с использованием фотопластинок [12]. Подготовка исследуемого материала заключается в приготовлении полированных или прозрачных шлифов, а в случае необходимости исследования отдельных минеральных зерен специальных препаратов из них.

Полированные шлифы - один край его отшлифованной поверхности срезают под прямым углом.

Прозрачные шлифы готовится по схожим образом, но не покрывают покровным стеклом.

Препарат закрепляют на фотографической пластинке с помощью специального зажима и помещают в ящик для экспонирования размером 30x20x20 см, изготовляемого из металла или дерева; внутреннюю его поверхность зачерняют или оклеивают черной бумагой. Ящик закрывают плотной крышкой, лучше двойной, чтобы внутрь не мог проникнуть свет.

Продолжительность экспозиции зависит от радиоактивности образца и от характера анализа (табл. 10).

После экспонирования (перед проявлением), шлифы с пластинками кладут на стекло горизонтально шлифом вниз и пластинку засвечивают путем включения электрической лампочки на 1 сек.

Микрорадиографический анализ состоит из двух этапов: качественного, который дает возможность выяснить присутствие на исследуемой поверхности радиоактивных элементов и характера их распределения, и количественного, с помощью которого определяют активность выделенных на исследованной поверхности радиоактивных проявлений.

Табл. 10 - Ориентировочные экспозиции при микрорадиографическом анализе

| суммарная активность, % урана | необходимое время экспозиции, ч |
|-------------------------------|---------------------------------|
| 70-45 | 0,3 |
| 40-20 | 0,75 |
| 20-15 | 1,0 |
| 15-10 | 1,5 |
| 10-5 | 2,0 |
| 5-1 | 3,0 |

Микрорадиография с жидких фотоэмульсий [12]. Наиболее тесный контакт между поверхностью исследуемого образца и эмульсией создается при нанесении жидкой эмульсии на поверхность исследуемого образца.

На шлифе отмечают площадь размером 5 см², в которую входят все поверхность шлифа и небольшая часть стекла вокруг шлифа породы. На отмеченный участок наносят 5-6 капель жидкой задубленной эмульсии и равномерно распределяют по поверхности. После сушки слой эмульсии имеет толщину 22-26 мк; в результате химической обработки она уменьшается до 11-13 мк. После экспозиции следует химическая обработка эмульсионного слоя.

Определение пробегов необходимо для изучения природы радиоактивности и отдельного измерения урана, тория (и радоновых эффектов). Для определения активности сравнивают число следов на единице площади образца с плотностью следов для эталонов [19].

Качественный микрорадиографический анализ [12]. Требуется значительная экспозиция, чтобы получить совершенно четкую картину распределения радиоактивных элементов на исследуемой поверхности. Для выделения включений радиоактивных минералов, если последние содержат не менее 0,5% урана, достаточна экспозиция в течении 5-6 суток. Если же на исследуемой поверхности не имеется отдельных включений радиоактивных минералов, то эта экспозиция вполне достаточна для того, чтобы по полученной плотности следов альфа-частиц определить характер распределения радиоактивных минералов в материале, содержащем не менее 0,1% урана.

В случае, когда исследованию подвергаются породы, содержащие несколько тысячных долей процента урана, экспозиция должна быть более длительной - 18-20 суток.

Исследуется равномерность распределения следов альфа-частиц (последние, как правило, имеется ореолы).

Количественный микрорадиографический анализ [12]. Время экспозиции следует подбирать экспериментально. Экспозиция должна быть такой, чтобы в поле зрения микроскопа оказалось

достаточное для подсчета количество следов альфа-частиц (не менее 2-3 и не больше 40-50 в поле зрения размером 0,02 мм²).

Как правило, применяют увеличение x500. При этом увеличении в поле зрения микроскопа четко видны отдельные следы альфа-частиц. Следы альфа-частиц уходят в глубь эмульсии (царапина при перемещении тубуса исчезает полностью).

Для подсчета следов удобно, чтобы поле зрения имело квадратную форму. Площадь поля зрения должна быть измерена с помощью объект-микрометра. Если следы альфа-частиц расположены более-менее равномерно по всей исследуемой площади, достаточно исследовать пластинку в двух взаимно перпендикулярных направлениях, чтобы с достаточной точностью определить среднюю плотность следов альфа-частиц.

Следы альфа-частиц в эмульсии имеют различные пробеги - от нулевых до максимальных.

Определение радиоактивности образцы выполняют обычно относительным способом - путем сравнения плотности следов альфа-частиц образцы и эталонного минерала. В качестве эталона можно использовать любой однородный по составу минерал, в котором содержание урана определено химическим путем.

Обычно определяют по эталон чувствительность к альфа-излучению для пластинок данного типа, количество частиц, соответствующих 1% урана, и использовать эту величину в качестве пересчетного коэффициента при определении активности.

Задача. Рассчитать суммарную активность исследуемого образца при микрорадиографическом анализе [22].

Пример 1. Плотность следов альфа-частиц исследуемого минерала оказалась равной $1250 \frac{\text{альфа-частиц}}{\text{мм}^2 \cdot \text{ч}}$ и для пластинок данного типа содержанию 1; урана соответствует $46 \frac{\text{альфа-частиц}}{\text{мм}^2 \cdot \text{ч}}$, то активность исследуемого материала будет эквивалентна $\frac{1250}{46} = 26,6\%$ урана.

Если в исследуемом материале предполагается присутствие определенного радиоактивного минерала, в качестве эталона

рекомендуется брать именно этот материал. Расчет радиоактивности в этом случае производят по формуле

$$A = Q_3 \frac{d_{II}}{d_3}, \quad (2.80)$$

где d_{II} - плотность следов альфа-частиц исследуемого минерала; d_3 - плотность следов альфа-частиц эталонного минерала; Q_3 - содержание радиоактивных элементов в эталонном минерале.

Наибольшая длина пробега в урано-радиевом семействе отмечается у альфа-частиц RaC' (6,87 см), в ториевом ряду - ThC' (8,53 см) и в актино-урановом ряду – актиния А (6,42 см). Альфа-частицы с большей длиной пробега можно не учитывать из-за малого выхода [39]. Для некоторых видов фотоэмульсий средняя длина пробега альфа-частиц для RaC' 38,5 мк, а для ThC' - 47,3 мк.

Задача. Определение альфа-методом отношение Th/U в толстых слоях минерала (И.Кюри, 1946) [22]. Используется формула Эванса для значений a_H числа альфа-частиц, излучаемых в 1 сек насыщенным для альфа-частиц слоем пробы площадью 1 см²:

$$a_H = \frac{a_V}{4} k(R_0 - \zeta) \quad (2.81)$$

где a_V - число альфа-частиц, излучаемых 1 см³ вещества в 1 сек; R_0 - пробег альфа-частиц в воздухе; ζ - минимальный остаточный пробег, который может быть зафиксирован; $k = \frac{R}{R_0}$ (где R - пробег альфа-частицы в исследуемом веществе), для данной фотоэмульсии k величина постоянная.

Если радиоактивное вещество одновременно содержит торий, уран и актиноуран, то самые длинные следы будут принадлежать альфа-частицам. испускаемым ThC' .

Число альфа-частиц, которые имеют пробег в воздухе более 7 см и, несомненно, принадлежат ThC' , согласно формуле Эванса равно

$$a_{H(7)} = 0,663 \frac{a_{V,Th}}{4} k(8,53 - 7),$$

где 0,663 – выход альфа-частиц с данным пробегом.

Число альфа-частиц в воздухе более 5,8 см составляет

$$a_{H(5,8)} = 0,663 \frac{a_{V,Th}}{4} k(8,53 - 5,8) + \frac{a_{V,U}}{4} k(6,87 - 5,8) + \frac{a_{V,U}}{4} k \cdot 0,04 \cdot (6,42 - 5,8)$$

Частицы с длиной пробега в воздухе от 5,8 до 7 см принадлежат ThC' , AcA ; частично это – альфа-частицы ThC , замедленные в слое исследуемого вещества. Их число определяют – как разность между $a_{H(5,8)}$ и $a_{H(7)}$:

$$a_{H(5.8-7)} = 0,663 \frac{a_{V,Th}}{4} k \cdot 1,73 + \frac{a_{V,U}}{4} k \cdot 1,10, \text{ или}$$

$$\frac{a_{H(5.8-7)}}{a_{H(7)}} = 0,8 + \frac{a_{V,U}}{a_{V,Th}} \cdot 1,10$$

$$\frac{a_{V,U}}{a_{V,Th}} = 3 \frac{Q_U}{Q_{Th}}$$

$$\frac{Q_U}{Q_{Th}} = \frac{3}{\frac{a_{H(5.8-7)}}{a_{H(7)}} - 0,8}$$

Практически при определении длины следа альфа-частиц в эмульсии ограничиваются измерением только проекции следа на поверхность эмульсии. Измерение производят только для тех следов, которые идут по поверхности эмульсии или располагаются к ней под небольшим углом. При исследовании каждого минерала рекомендуется измерить длины порядка 100 следов альфа-частиц. по количеству измеренных следов, пробег которых в эмульсии больше 42 мк (что соответствует пробегу в воздухе более 7 см), определяют величину $a_{H(7)}$. Затем вычисляют разность между общим количеством измеренных следов и величиной $a_{H(7)}$. Эта разность соответствует количеству следов альфа-частиц, пробег которых в эмульсии колеблется между 34,8 и 42 мк, т.е. определяется величина $a_{H(5.8-7)}$. После этого вычисляют отношение Th/U.

Пленочные твердотельные детекторы. Для обнаружения газообразного радона, с "подавлением" продуктов его распада применяют пассивные твердотельные детекторы радона чашечного типа. Они выполняют интегрирующие по времени измерения. В качестве чувствительного элемента используются детектор ядерных треков, представляющий собой поликарбонатную пленку, помещенную в пластмассовую чашку, покрытую стекловолоконным фильтром, подавляющим поступление рожденных в атмосфере дочерних продуктов радона (Рис.9), а для препятствования поступлению короткоживущих изотопов радона в детектор, чашку часто покрывают тонкой полимерной пленкой [5]. Время прохождения ДПР через этот фильтр больше времени распада этих короткоживущих изотопов.

Таким образом, число зарегистрированных треков соответствует числу α -частиц, достигших пленки детектора. Они генерировались дочерними продуктами радона, образовавшимися уже в объеме детектора.

После экспозиции, пленку детектора электрохимически протравливают и треки считают визуально или с помощью специального устройства. На данный момент существуют аппаратно-программные комплексы, позволяющие считать количество треков, оценивать их плотность и по данным эталонирования подсчитывать среднюю концентрацию радона.

Модифицированный (двухпленочный) чашечный метод (или метод дублированного альфа-трека (DTD)) может быть использован для отдельного измерения концентраций радона и торона при их совместном присутствии в атмосфере. В этом методе используют две диффузионные камеры с АТД, которые позволяют различать эманации по периоду полураспада торона (56 с) и радона (3,8 г).

Радон-тороновый пассивный пленочный трековый детектор (рис. 14) представляет собой ячейку из двух полусферических стальных камер диаметром 120 и 75 мм. Анализируемый воздух поступает в большую камеру и через капиллярное отверстие диффундирует в меньшую камеру. В каждой камере имеется свой пленочный детектор. Пленка в большой (входной) камере регистрирует треки α -частиц, возникающие в основном из-за распада торона и его дочерних продуктов. Вторая пленка (в дальней малой камере) регистрирует треки, обусловленные распадом радона и его активного налета при незначительном вкладе торона. Торон за время прохождения по капилляру успевает распасться. После экспонирования пленки подвергают травлению и определяют плотность распределения треков по поверхности детектора. Предел обнаружения составляет 3 Бк/м³ для радона и 9 Бк/м³ для торона при 2-х месячной экспозиции [5].

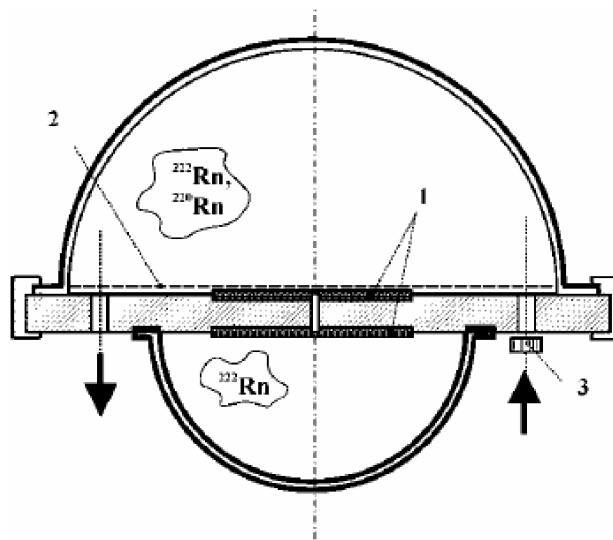


Рис. 14 – Устройство с двумя пленочными твердотельными детекторами для одновременного определения концентраций радона и торона в воздухе

1 – поликарбонатные мембраны; 2 – пористый металл; 3 – фильтр из стекловолокна

Подсчет треков в твердотельном материале. Новый метод оценки долгосрочной комплексной экспозиции радона был недавно разработан в Швеции. В этой методике измеряется количество Po-210 в стеклах. Короткоживущие ДПР оседают на стекло (альфа-излучатель Pb-214, который в свою очередь распадается до Pb-210). Активность Pb-210 или его дочернего продукта распада Po-210 может быть использован для оценки кумулятивного воздействия на обитателей дома. Активность эманаций, отображенная в стеклах, измеряется с помощью крупноразмерной ионной камеры или детекторов с поверхностным фильтром, позволяющим считывать излучаемую альфа-энергию 5,3 МэВ (рис. 15). Фиксируемое явление базируется на том, что альфа-частицы, испускаемые дочерним нуклидом (Pb-210), распространяются в обратном направлении и оказываются поглощенными в теле стекла вблизи его поверхности. Приблизительно 30% этого излучения депонируется в стекле.

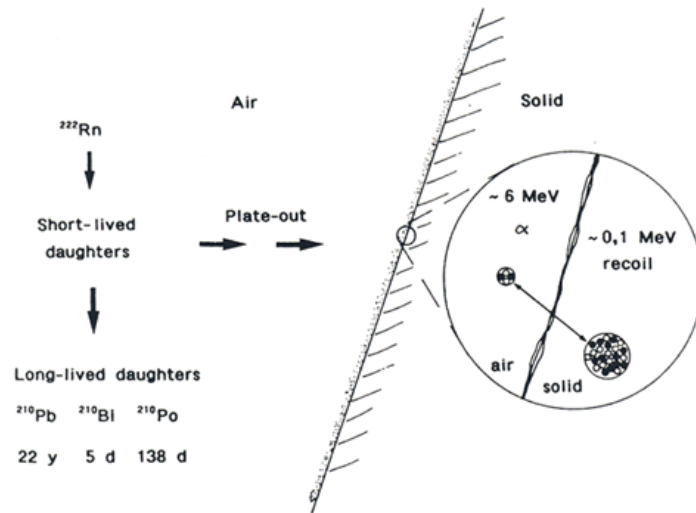


Рис. 15 – Поверхность пластины из следами альфа-треков
 Диапазон отката альфа-ядер в стекле составляет около 50 нм

2.5 Фильтрационные методы регистрации радиоактивных газов

Определение радона по продуктам его распада в методе фильтров. Большинство методов определения дочерних продуктов радона требует кратковременного пропускания строго определенного объема изучаемого воздуха через фильтр с последующим измерением активности фильтра (во время отбора газа или после). Процесс детектирования существенно упрощается, поскольку данный способ нечувствителен к различиям в энергии α -частиц от различных нуклидов [5].

При условии равновесия между радоном и продуктами его распада, неизменности концентрации радона и постоянства скорости пропускания воздуха через фильтр возможно переставить следующую зависимость, где указано что число α -или β -частиц, испускаемых при распаде каждого из осевших на фильтр продуктов распада радона, для времени измерения t_2-t_1 будет соответственно равно:

$$N_{RaA(\alpha)} = 2,229Q\varepsilon\Delta_A^2 Aa \quad (2.82)$$

$$N_{RaB(\beta)} = 2,229Q\varepsilon^* \times \left[\frac{\Delta_A^3 Aa}{\Delta_A - \Delta_B} + \frac{\Delta_B^3 - Bb}{\Delta_B - \Delta_A} \right] \quad (2.83)$$

$$N_{RaC(\beta)} = 2,229Q\varepsilon^* \times \left[\frac{\Delta_A^4 Aa}{(\Delta_A - \Delta_B)(\Delta_A - \Delta_C)} + \frac{\Delta_B^4 Bb}{(\Delta_B - \Delta_A)(\Delta_B - \Delta_C)} + \frac{\Delta_C^4 Cc}{(\Delta_C - \Delta_A)(\Delta_C - \Delta_B)} \right] \quad (2.84)$$

$$N_{RaC'(\alpha)} = 2,229Q\varepsilon^* \times \left[\frac{\Delta_A^5 Aa}{(\Delta_A - \Delta_B)(\Delta_A - \Delta_C)(\Delta_A - \Delta_{C'})} + \frac{\Delta_B^5 Bb}{(\Delta_B - \Delta_A)(\Delta_B - \Delta_C)(\Delta_B - \Delta_{C'})} + \frac{\Delta_C^5 Cc}{(\Delta_C - \Delta_A)(\Delta_C - \Delta_B)(\Delta_C - \Delta_{C'})} \right] \quad (2.85)$$

где $A = 1 - e^{-\theta/\Delta_A}$, $B = 1 - e^{-\theta/\Delta_B}$; $C = 1 - e^{-\theta/\Delta_C}$; $C' = 1 - e^{-\theta/\Delta_{C'}}$; $a = 1 - e^{-t_1/\Delta_A} - e^{-t_2/\Delta_A}$; $b = 1 - e^{-t_1/\Delta_B} - e^{-t_2/\Delta_B}$; $c = 1 - e^{-t_1/\Delta_C} - e^{-t_2/\Delta_C}$; $c' = 1 - e^{-t_1/\Delta_{C'}} - e^{-t_2/\Delta_{C'}}$; v - скорость фильтрации воздуха, л/мин; Q - концентрация радона; ε и ε^* - коэффициенты чувствительности α - и β -излучения соответствующей установкой.

Обозначим Δ время, в течение которого атомы радиоактивного элемента распадутся до части, равной $1/e$ от первоначального количества, т.е. среднее время жизни атомов, равное $1/\lambda$. Тогда Δ_A , Δ_B , Δ_C и $\Delta_{C'}$ будет соответственно среднее время жизни RaA , RaB , RaC и RaC' , θ - время фильтрации воздуха в минутах, t - время, прошедшее с момента отбора пробы до ее измерения.

Так как $\Delta_{C'}$ очень мало, количество α -частиц для RaC' будет практически определяться таким же множителем, как и количество β -частиц для RaC .

После подстановки численных значений коэффициентов выражения, связывающие концентрацию соответствующих продуктов распада радона с концентрацией радона, примут вид:

$$N_{RaA(\alpha)} = 19,4 Aa 2,29Q\varepsilon \quad (2.86)$$

$$N_{RaB(\beta)} = (-2,5 Aa + 1687 Bb) Q\varepsilon 2,229\varepsilon^* \quad (2.87)$$

$$N_{RaC(\beta)} = (0,5 Aa + 6367 Bb - 2652 Cc) Q\varepsilon 2,229\varepsilon^* \quad (2.88)$$

$$N_{RaC'(\beta)} = (0,5 Aa + 6367 Bb - 2652 C'c) Q\varepsilon 2,229\varepsilon^* \quad (2.89)$$

Используя эти выражения, можно определить концентрацию

радона (в микрокюри/л), если известно общее число зарегистрированных α -или β -частиц, испускаемое соответствующими продуктами распада.

Эффективный период полураспада активного налета радона 40 минут. Эффективный период полураспада активного налета торона 10,6 часа.

Кинетика распада активного налета может быть использована для определения концентраций радона и торона при их совместном присутствии.

С целью анализа воздух пропускают через фильтр и измеряют кривую изменения α -активности фильтра от времени (рис. 16, 17). Активный налет долгоживущего радона распадается довольно быстро (эффективный период полураспада 40 мин) и на фильтре остается долгоживущий активный налет от короткоживущего торона (эффективный период полураспада 19,6 часа). Разлагая по стандартной методике кривые распада можно найти вклады радона и торона [22].

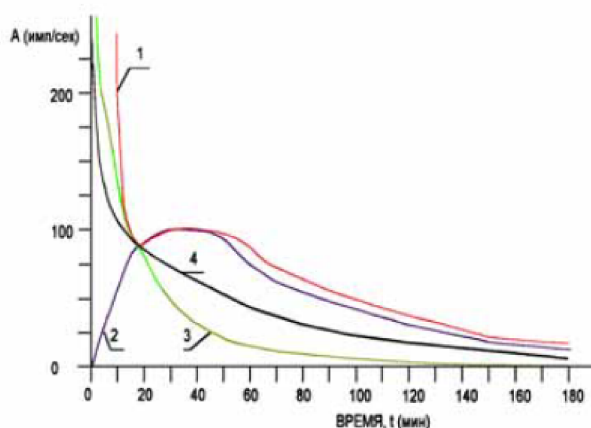


Рис. 16 – Теоретические кривые изменения α -активности фильтра после пропускание сквозь него воздуха, содержащего аэрозоли с продуктами распада радона. Соотношение $A_0:V_0:C_0$: 1) 1:0:0; 2) 0:1:0; 3) 1:8,9:6,5 (в состоянии равновесия)

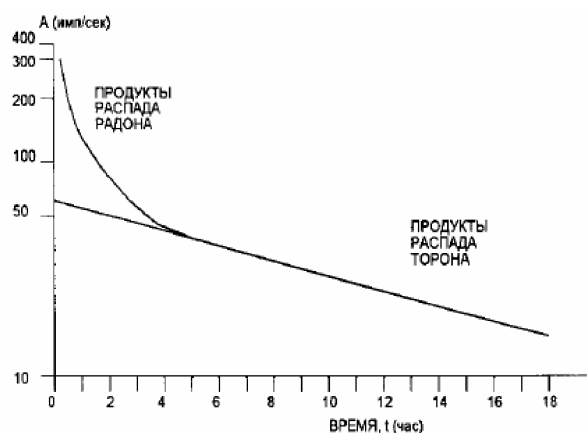


Рис. 17 – Кривые распада α -активности фильтра (смесь радона и торона).

Раздельное определение радона, торона и актинона по

продуктам распада смеси эманаций в методе фильтров. В методе двух фильтров возможно раздельное определение состава системы радон-торон и торон-актинон.

В первом варианте (радон-торон) для раздельного определения радона и торона воздух сначала проходит через первый фильтр, на котором оставляет аэрозоли, торон и продукты распада радона, пересекает камеру и выходит через второй фильтр. Выходящий фильтр собирает все продукты распада радона, сформированные в камере. Для того, чтобы минимизировать потери на стенках камеры, скорость потока должна быть установлена таким образом, чтобы позволить образование продукта распада радона только внутри камеры. Анализ активностей эманаций может быть выполнен после отбора проб (захват выборки воздуха) или во время фильтрации сцинтилляционным или полупроводниковым альфа-спектрометром непрерывно во времени.

Регистрирующая схема смеси радон-торон обычно реализуется методом совпадений. Как известно, торон с периодом 55,6 сек превращается в полоний-216, который имеет период полураспада 0,15 сек. Оба нуклида являются α -излучателями. Этими обстоятельствами можно воспользоваться для регистрации торона на фоне радона. В простом варианте метода используется обычная сцинтилляционная камера с ФЭУ. Однако здесь сигнал с ФЭУ поступает на двухканальное устройство. В первом канале регистрируется суммарная скорость счета (радон + торон), а во втором канале регистрируются альфа-альфа совпадения торона и полония-216. Сигнал со второго канала поступает в том случае, если два акта распада произошли во временном интервале от 0,012 до 0,6 сек. В первом приближении можно полагать, что во втором канале регистрируется исключительно торон. Для уточнения используются калибровка по эталону и специальный математический аппарат. При использовании сцинтилляционной камеры объемом 1,4 л удастся надежно регистрировать концентрации 7 Бк/м³ и 1 Бк/м³ для радона и торона, соответственно.

2.6 Методы мониторинга радона

Методы регистрации концентрации радона как функции от времени являются мониторинговыми. Как правило, мониторинговые наблюдения предполагают ряд дискретных измерений (или отбора проб) на протяжении периода измерений. На основании этих данных рассчитывается средняя концентрация радона. В тех случаях, когда длительный интегрирующий мониторинг нежелателен, самым обычным является отбор образцов.

Существует три класса методов мониторинга радона в окружающей среде: интегрирующие во времени, непрерывные и дискретные [5].

По способу проведения отбора проб и измерений радона существуют следующие режимы:

- 1) с отбором образцов проб (воздуха, воды);
- 2) с непрерывным активным отбором проб (например, при измерении плотности потока радона с почвы);
- 3) комплексный отбор.

Отбор проб обеспечивает проведение мгновенных измерений радона или дочерних продуктов распада радона в воздухе. Поскольку значения концентрации радона колеблются в широких пределах и зависят от различных факторов, метод отбора является рядовой методикой мониторинга радона. В отличие от средств измерений интегрального типа, радоновые мониторы обеспечивают не только измерение интегральной объёмной активности радона в воздухе, но и возможность анализировать изменение объёмной активности радона в воздухе в течение длительного (до нескольких месяцев и даже лет) времени, сопоставлять эти изменения со временем суток, года, наружными метеоусловиями и т.д.

Непрерывный активный отбор проб воздуха включает в себя проведение нескольких измерений через равные промежутки времени на протяжении длительного периода. Этот метод дорог и рекомендуется только тогда, когда другими способами определение проблемы и обнаружение источника радона затруднительно.

Комплексный отбор – по своей сути пассивный метод сбора данных об уровнях радона в течение фиксированного периода времени. Выполняется устройствами для отбора проб на основе активированного угля или альфа-трековых пленочных детекторов.

Измерения радона обычно рассматривают в терминах краткосрочного или долгосрочного опробования и измерения.

Краткосрочные опробования и измерения радона имеют преимущество в оперативности получения информации о содержаниях радона, преимущественно менее затратны в сравнении со способами долгосрочных измерений и могут обеспечить первичную индикацию средней долгосрочной концентрации радона в доме. Для их проведения используются приборы инспекционного контроля и/или приборы, интегрирующие измерения с небольшим периодом измерений – 1-3 недели. Но в тоже время, они не лишены ряда методических недостатков.

При экстраполяции измеренных в краткосрочном режиме уровней радона в долгосрочную оценку должны быть приняты во внимание влияние суточных и сезонных колебаний концентрации радона, режима эксплуатации жилищ, концентрацию радона в целом. Иногда высокая изменчивость во времени содержаний радона делает краткосрочные измерения ненадежными в большинстве исследовательских целей.

Поскольку высокие концентрации радона обычно происходят в периоды, когда жилища "заперты" (т.е. при закрытых окнах), то краткосрочное измерение, выполненное в течение этого периода или сезона могут переоценить годовую среднюю концентрацию радона. Напротив, если краткосрочное измерение радона выполняется в период, когда в доме увеличилась вентиляция (например, при постоянно открытых окнах), можно существенно недооценить среднегодовую концентрацию радона.

Т.е. влияние всех этих факторов нужно учитывать для получения адекватных долгосрочных оценок.

Очевидно, что долгосрочные интегрирующие измерения радона являются предпочтительными для оценки среднегодовой концентрации радона в домах или других жилых помещениях, поскольку они используют накопленную на протяжении

длительного времени информацию. Они, в определенной мере, нивелируют временные природные флуктуации уровней радона, а в случае измерений в жилищах сглаживают изменчивость концентраций радона, связанных со строительными характеристиками жилищ, привычками жителей и т.д.

Решение о проведении краткосрочных или долгосрочных опробований и измерений радона принимается с учетом всех вышеприведенных факторов.

Измерение плотности потока радона-222 с поверхности грунта (с помощью радонметра "Альфарад Плюс"). Измерение плотности потока радона-222 с поверхности грунта основано на определении количества радона-222, накопленного в пробоотборнике или в измерительной камере за счет поступления с поверхности грунта известной площади. Для проведения измерений вокруг контрольной точки проводится подготовка горизонтального участка размером не менее $0,2 \times 0,2 \text{ м}^2$. Подготовка заключается в зачистке от снега, мусора, растительности и крупных камней, рыхления на глубину $3 \div 5 \text{ см}$ и выравнивания поверхности участка. Начинать измерение следует не раньше, чем через 20 минут после подготовки участка. Не допускается проведение отбора проб с поверхности мерзлого или залитого водой грунта.

С помощью радиометров радона семейства РРА (Альфарад, Альфарад Плюс) предусмотрено два способа выполнения измерений ППР. Первый способ предназначен для экспрессных измерений ППР и рекомендуется для начального обследования участка (рис. 18). Второй способ рекомендуется для повторного измерения ППР в контрольных точках, для которых по результатам начального обследования получены значения ППР, превышающие регламентированную величину $80 \text{ мБк}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ (рис. 19).

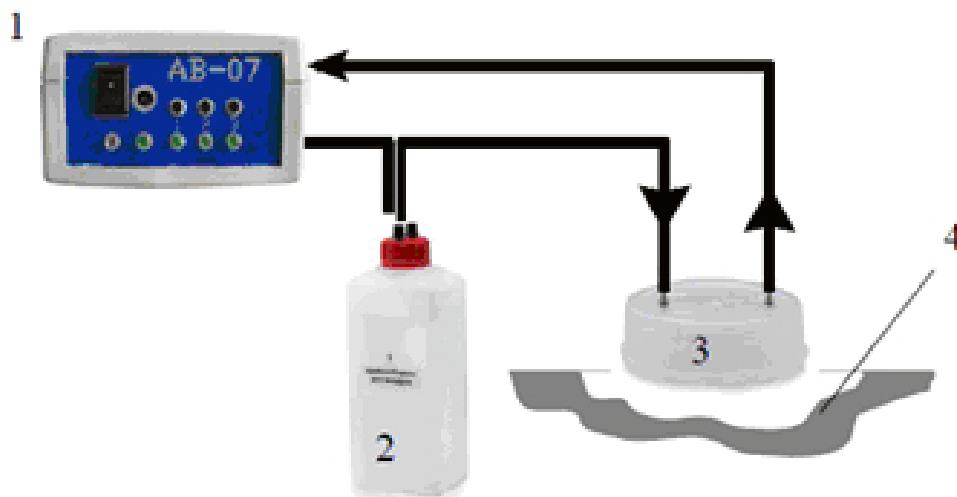


Рис. 18 – Схема отбора пробы для экспрессного определения плотности потока радона

(1 - автономная воздуходувка, 2 - воздушный пробоотборник, 3 - накопительная камера; 4 - грунт)

После окончания измерения на экран выводится полученное значение ППР, вычисленное по соотношению (экспрессное определение ППР):

$$ППР = Q \left(1 + \frac{V_2}{V_1} \right) \left(\frac{V_1 + V_2}{TS} \right) \exp(\lambda_{Rn} \cdot t), \quad (2.90)$$

где: Q – измеренное значение ОА, Бк·м⁻³; Q_{ϕ} – измеренное фоновое значение ОА, Бк·м⁻³; V_2 – объем измерительной камеры, $V_2=0,94$ л; V_1 – объем пробы в пробоотборнике, $V_1=1,05$ л; t – время, прошедшее от окончания отбора пробы до начала измерений, мин., $t=t_2-t_1$; λ_{Rn} – постоянная распада ²²²Rn, $\lambda=1,26 \cdot 10^{-4}$ мин.⁻¹, V_3 – свободный объем накопительной камеры и соединительных трубок, $V_3=0,563$ л, T – время работы автономной воздуходувки при отборе пробы из накопительной камеры в пробоотборник, $T = 300$ с; S – площадь сбора радона с поверхности грунта накопительной камерой, $S=0,0163$ м².

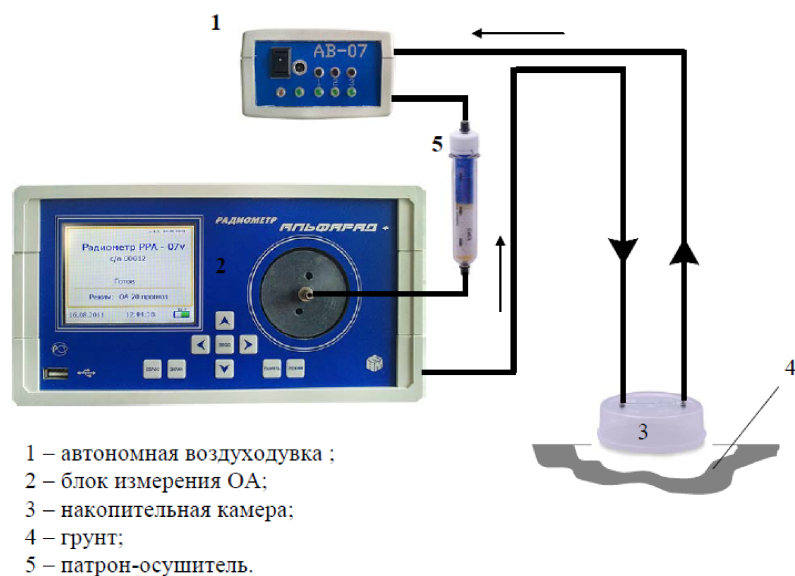


Рис. 19 – Схема отбора пробы воздуха для детального определения ППР

После окончания измерения на экран выводится полученное значение ППР, рассчитанное для 2-го способа отбора по соотношению:

$$ППР = (Q - Q_{\phi}) \left(\frac{V_2 + V_3}{TS_2} \right). \quad (2.91)$$

Измерения объемной активности радона в пробах воздуха (с помощью радонметра «Альфарад Плюс»). Измерение ОА радона в воздухе основано на отборе пробы атмосферного воздуха (рис. 20) в пробоотборник и последующем определении ОА в пробе путем перемешивания пробы между объемами пробоотборника и измерительной камеры блока измерения ОА (рис. 21).

При отборе проб воздуха используются специальные пробоотборники, входящие в комплект, а при лабораторном измерении воздух из пробоотборников переводят в измерительную камеру по соответствующей схеме.



Рис. 20 – Схема перевода проб воздуха в воздухозаборное устройство



Рис. 21 – Схема измерения активности радона-222 в пробе воздуха

При измерениях ОА радона в пробе воздуха выполняют следующие операции:

- измеряют остаточную активность радона в измерительной камере блока измерения ОА;
- перемешивают отобранную пробу воздуха между пробоотборником и измерительной камерой;
- измеряют ОА радона в измерительной камере.

После окончания измерения получают значение ОА радона в воздухе, рассчитанное с помощью соотношения:

$$Q_{воз} = Q \left(1 + \frac{V_2}{V_1} \right) \cdot \exp(\lambda_{Rn} \cdot t), \quad (2.92)$$

где: V_2 – объем измерительной камеры, $V_2=0,94$ л; V_1 – объем пробы в пробоотборнике, $V_1=1,05$ л; t – время, прошедшее от окончания отбора пробы воздуха до начала измерений, мин., $t=t_2-t_1$.

Измерения содержания радона в воде. Наличие радона в подземных водах, в основном, происходит за счет распада радия (^{226}Ra), находящегося в горных породах, почвах и меньшей степени – из растворенного в воде радия. Облучение радоном от водных радоновых источников может происходить либо в результате употребления воды или при вдыхании радона, который освобождается от воды.

Существует несколько подходов до измерения радона в воде. Они включают прямые γ -измерения, использование электретных

ионных камер, перевода газа на мембраны, жидкие сцинтилляторы. Последние являются наиболее распространенными методами измерения концентрации радона в воде.

Измерение радона в воде по подсчету количества эманаций предусматривает извлечение растворенного радона из воды и перевод его в газ, находящийся в сцинтилляционной камере. Обычно извлечение радона производят с помощью барботера. Сцинтилляционная камера наполняется газом, обогащенным радоном. Камера выдерживается 3 часа для установления радиоактивного равновесия между радоном и продуктами его распада. В зависимости от отсчета времени достигается предел обнаружения радона в 1 Бк/л.

Иной способ измерения содержания радона в воде основывается на факте более длительного периода полураспада радона в сравнении с его ДПР. После продувки воздуха через раствор с целью удаления всего накопившегося радона, барботер запаивают и оставляют на несколько дней для накопления радона. Для измерения количества накопившегося радона собирают установку. После этого в ионизационной камере создают вакуум при закрытом кране 7. Далее под резиновой трубкой обламывают конец барботера 1, осторожно приоткрывают кран и выпускают воздух из барботера в камеру. Для достаточно полного перевода радона в камеру отношение объемов камеры и барботера должно быть возможно большим. Если этого нельзя добиться, то применяют циркуляционный способ перевода радона в камеру (рис. 13в), создавая циркуляцию воздуха с помощью груши 8. Этим достигают равномерное распределение радона в системе, и в камеру попадает часть радона, равная отношению объема камеры к объему всей системы.

После введения радона в камеру его α -активность в течение 3-4 ч растет вследствие накопления короткоживущих продуктов распада. Далее начинается слабый спад из-за распада самого радона. Поэтому измерения образца и эталона вакуумным способом проводят одновременно после впуска радона в камеру. Расчет содержания радона упрощается, если при измерении с

пробой и эталоном выдерживать одинаковыми время накопления радона в барботере и другие условия измерения.

Если для пробы и эталона различаются время накопления радона в запаянном барботере или время, прошедшее с момента введения радона в камеру до измерения, то вводят поправку по специальным таблицам. В качестве эталона используют выпускаемые в ампулах растворы соли радия, содержащие примерно 10^{-10} - 10^{-8} г Ra.

При измерении сильно минерализованных вод или жидкостей со значительным коэффициентом растворимости α для повышения точности результатов в схему эталонирования необходимо включить промывалку с жидкостью такого же состава. Определение содержания радона в сильно газированных водах следует проводить *вакуумным методом*.

Измерения объемной активности радона в пробах воды" с помощью радонметра "Альфарад Плюс" (с помощью радонметра "Альфарад Плюс"). Измерения ОА в пробах воды основаны на использовании "классического" циркуляционного способа перевода радона вместе с воздухом из объема пробы в рабочую камеру блока измерения ОА в процессе барботирования.

При отборе проб воды используются специальные пробоотборники, входящие в комплект радиометра. Предусмотрено два способа отбора, обеспечивающих получение правильных результатов измерения (рис. 22).

Общими требованиями к пробоотбору вод является полное заполнение пробоотборников водой и избежание попадания в сосуд пузырьков газа. Ввиду легкой дегазации радона из воды, можно значительно снизить содержание радона в воде. Следовательно при отборе должны применяться тонкие и гибкие трубки или шланги для придания ламинарного типа течения воды.

Для отбора пробы из водоема или емкости с открытой поверхностью воды со штуцеров пробоотборника удаляют резиновые заглушки. На штуцер, противоположный крышке пробоотборника (обозначен «верх»), надевают соединительную трубку с воронкой, входящей в состав комплекта.

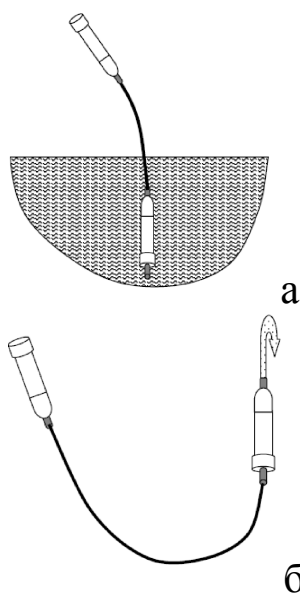


Рис. 22– Отбор проб воды из различных водопунктов

а – из открытого источника; б – из струи

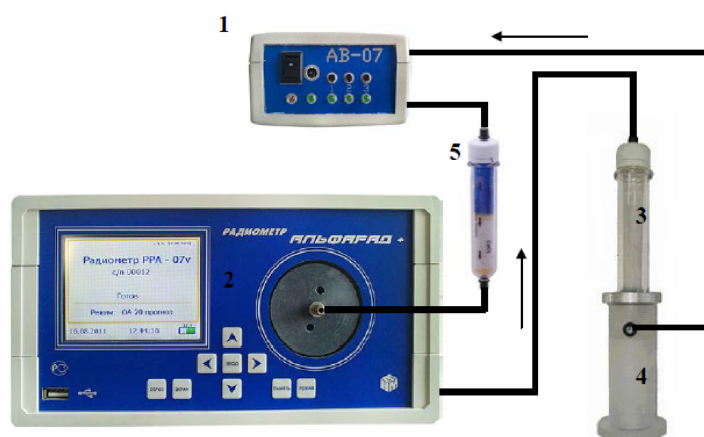


Рис. 23– Схема перевода радона в измерительную камеру радиометра

1 – автономная воздуходувка АВ-07; 2 - блок измерения ОА; 3 – пробоотборник воды с рассекателем; 4 – барботер; 5 – патрон-осушитель.

Отбор проводят до момента выравнивания уровней воды в трубке и водоеме. Это обеспечивает полное заполнение пробоотборника водой. Закрывают сверху воронку пальцем. Пробоотборник извлекают из воды, его свободный штуцер закрывают заглушкой, после чего со второго штуцера снимают соединительную трубку и на ее место одевают заглушку. Отбор закончен.

Для отбора воды из струи (скважина, водопровод и т.д.) используют пробоотборную воронку (трубку), входящую в состав комплекта. Со штуцеров пробоотборника удаляют заглушки, и на штуцер, расположенный на крышке пробоотборника, надевают соединительную трубку с воронкой. При появлении устойчивой струи из свободного штуцера пробоотборника его закрывают заглушкой, со второго штуцера снимают трубку и одевают заглушку. Отбор закончен. По окончании отбора записывают в протокол измерений время отбора t_1 .

При измерениях ОА радона пробы выполняют следующие операции (рис. 23):

- измерение остаточной активности радона в измерительной камере;
- перевод радона из пробы в измерительную камеру;
- измерение ОА.

После окончания измерения на экран выводится полученное значение ОА радона в воде, рассчитанное с помощью соотношения:

$$Q_6 = Q \left(\alpha + \frac{V_2}{V_1} \right) \cdot \exp(\lambda_{Rn} \cdot t) \quad (2.93)$$

где: V_2 – объем измерительной камеры, $V_2=0,94$ л; V_1 - объем отобранной пробы воды в пробоотборник, $V_1=0,046$ л; t - время, прошедшее от момента окончания отбора пробы воды до начала измерений, мин, $t=t_2-t_1$; λ_{Rn} - постоянная распада ^{222}Rn , мин.⁻¹, $\lambda=1,26 \cdot 10^{-4}$ мин.⁻¹; α - коэффициент растворимости радона в воде, $\alpha=0,25$.

Измерение концентраций радона в подземных водах определяют по результатам опробования и следующего измерения вод бюветов и родников в полевых условиях или непосредственно у источников в течение 10-40 мин. после отбора проб.

Для определения концентрации радона в воде источника необходимо отбирать пробу как можно ближе к месту выхода воды на поверхность земли. Следует помнить, что радон легко выделяется из воды при соприкосновении ее с воздухом. Отбирать всегда необходимо воду незастоявшуюся, поэтому последнюю желательно по возможности предварительно откачать [5].

Другие мониторинговые методы измерения радона. Определение содержания короткоживущих продуктов распада изотопов радона в атмосфере по методу наведенной активности реализуется на основе анализа кривых распада активного налета короткоживущих продуктов распада радона — RaA, RaB, Ra(C+C'+C'') и торона ThA, ThB, Th(C+C'+C'') на металлической проволоке. Поскольку дочерние продукты распада радона и торона имеют электрический заряд, то они могут быть собраны на отрицательно заряженной металлической проволоке. Меняя время экспозиции, можно относительно изменять темп

накопления зарядов ДП радона и торона (при более длительной экспозиции больше накапливаются ThB). По окончании экспозиции собранную проволоку помещают в сцинтилляционную камеру для измерений [5].

Определение короткоживущих продуктов распада радона в воздухе реализуется по идее «Определение радона по продуктам его распада в методе фильтров» как рутинный анализ кривых изменения альфа-активности фильтров, на которых осаждались продукты распада радона [5].

Отбор проб радона в грунте обычно выполняется с помощью грунтовых полых пробников, через которые отбирается проба воздуха.

Адсорбционные методы мониторинга радона используют пассивные детекторы радона на основе активированного угля.

2.7 Обеспечение качества измерений

Основными метрологическими характеристиками системы измерений общей активности системы радона (и/или торона) в воздухе являются:

- чувствительность;
- уровень собственного фона;
- диапазон измерений;
- предел основной погрешности измерений (а также погрешности определения влажности, температуры, давления);
- эффективность регистрации α -излучения ДПР и ДПТ (эффективность улавливания аэрозолей);
- расход воздуха при отборе проб (прохождения через фильтр для аэрозольных модификаций эманометров).

Эталонирование прибора проводится при каждой серии измерений. С помощью резиновой груши или циркуляционного насоса создается циркуляция воздуха в системе, обеспечивающая равномерное распределение радона по всему объему. В этом случае соблюдают равенство условий измерения пробы и эталона [3]. Постоянная прибора (цена деления прибора в минуту в граммах тория) определяются по формуле:

$$j = \frac{q}{I_e - I_f} \left(\frac{zTh}{\text{делений/мин}} \right), \quad (2.94)$$

где q – количество ThX (^{228}Ra) в эталоне в граммах равновесного тория; I_e – скорость счета эманаций, I_f – скорость счета фона.

В качестве эталона используется раствор «старой» (больше 50 лет с момента приготовления) соли тория или раствор ториевого минерала, содержащего несколько миллиграммов тория.

2.8 Приборы для мониторинга радона

Средство, позволяющее обнаружить наличие ионизирующего излучения путем непосредственного взаимодействия с веществом этого объекта - *детектор, индикатор* или *монитор излучения*. Детекторы бывают ионизационными, сцинтилляционными, полупроводниковыми.

Относительно объектов измерений радона в воздухе радиометры разделяются на 2 группы:

- 1) измеряющие радон как газ;
- 2) измеряющие радон по его ДПР в виде аэрозолей.

Несмотря на то, что ДПР радона, начиная с ^{218}Po и ^{214}Po , ответственны за формирование большей части дозы облучения, концентрация газа считается хорошим заменителем концентрации всех продуктов распада. Кроме того, измерения газа радона, как правило, предпочтительнее измерения его продуктов распада из-за своей относительной простоты и экономической эффективности.

По способу измерений радиометры радона делятся на 2 главные группы:

- 1) приборы инспекционного контроля;
- 2) приборы, интегрирующие измерения.

Приборы инспекционного контроля реализуют способ определения активности радионуклидов с относительно частыми измерениями во времени – в экспрессном режиме. Время экспозиции выдерживается в несколько минут или несколько десятков минут, что сопоставимо с периодом распада наиболее

короткоживущих радионуклидов. Они применяются для получения быстрой оценки радоноопасности конкретного исследуемого объекта.

В этой реализации измерения используются следующие методы измерений:

- отбор объема воздуха;
- активной сорбции;
- электростатические мониторы;
- измерители ДПР с прокачкой на фильтр.

Приборный парк этой группы представлен радиометрами радона, радиометрами аэрозолей.

Приборы, интегрирующие измерения, имеют более длительное время экспозиции - от нескольких дней до года, что позволяет усреднить возможные колебания активностей радона. Их функция давать оценку среднегодовых значений ЭРОА радона в воздухе жилых домов и других помещений [5]. В этом подходе используются следующие методы измерений:

- электретный;
- трековый;
- адсорбционный (на основе активированного угля).

Для выполнения таких измерений применяются пассивные трековые и адсорбционные детекторы радона.

Радонометры. Существуют различные модификации радонометров (РГА-500, САС-Р-2, РГГ-01Т), но в настоящее время наиболее распространены радонометры, в которых измерение объемной активности в воздухе основано на регистрации излучения ДПР – RaA с помощью ППД. Нижняя граница диапазона измерений лежит в пределах 20-50 Бк/м³ [5].

К таким приборам относится радонометр РРА-01 и его модификации (РРА-03, «Альфарад Плюс»).

Примером радиометра радона со сцинтилляционным детектором является устройство «Альфарад Плюс». В этом приборе соединяются возможности как полевого, так и лабораторного устройства (рис. 23).



Рис. 24 – Радиометр радона "Альфарад Плюс"

Этот прибор имеет расширенные функциональные свойства, что позволяет ему проводить измерения ОА радона, торона и их ДПР в воздухе; измерения ЭРОА радона и торона в воздухе жилых, общественных и производственных зданий и сооружений; проводить контроль радона в источниках питьевого водоснабжения и питьевой воды; измерять ППР с поверхности почвы земельных участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения, а также измерять ОА радона в почвенном воздухе. Для корректировки влияния содержания влаги на чувствительность камеры в состав радиометра встроен блок датчиков климатических параметров (температура, влажность, давление).

Принудительный отбор проб воздуха в измерительную камеру осуществляется с помощью микровоздуходувки и контролируется датчиком расхода воздуха, следящим за объемной скоростью прокачки пробы через блоки детектирования.

Наличие одноплатного РС-компьютера в составе радиометра позволяет задавать различные режимы измерений, проводить обработку результатов, тестировать режимы работы блоков радиометра, представлять результаты измерений и хранить их в удобном виде, сбрасывать информацию на флэш-память, по сети или на персональный компьютер (через USB-порт). Энергоснабжение радиометра осуществляется от автономного источника питания повышенной емкости.

Измерение ЭРОА радона и торона в радиометре радона «Альфарад Плюс» основано на осаждении дисперсной фазы радиоактивных аэрозолей из контролируемого воздуха на аэрозольный фильтр с последующим измерением количества ДПР радона и торона на фильтре по числу зарегистрированных α -частиц распада RaA , RaC' и TnC' .

Блок измерения ЭРОА содержит устройство отбора проб с кареткой, на которой расположены фильтродержатель с электроприводом. Платы ППД и ПУ собраны на отдельном шасси и закрыты общим металлическим кожухом (рис. 25). Фильтродержатель обеспечивает фиксацию и герметизацию фильтра АФА-РСП-3 и может перемещаться вместе с кареткой по направляющим с позиции отбора пробы на позицию измерения и обратно с помощью электропривода. Положение каретки контролируется двумя концевыми датчиками, которые установлены на плате. Фильтродержатель соединен гибким шлангом с воздуходувкой, объемный расход воздуха, которой регулируется с помощью специального датчика.

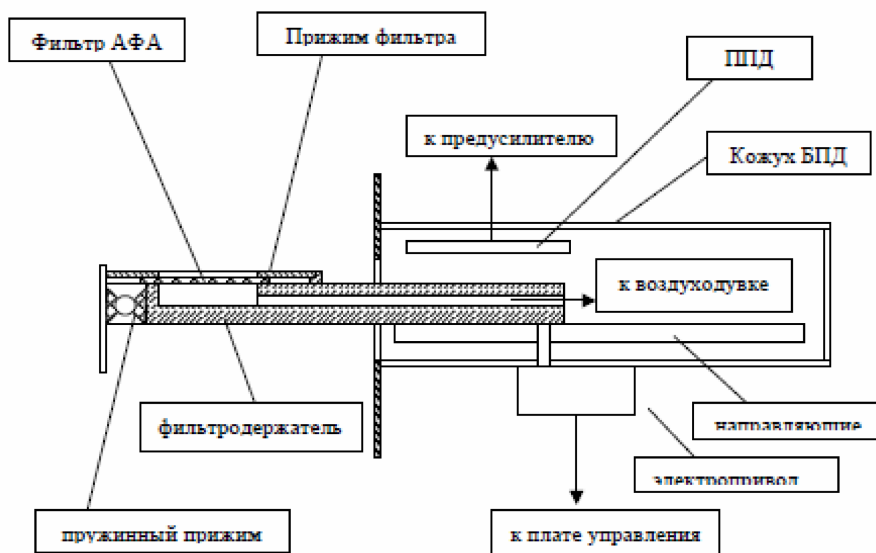


Рис. 25 – Устройство отбора проб блока измерения ЭРОА

Электрические импульсы, образующиеся под воздействием на ППД α -частиц, усиливаются ПУ, поступают на вход БУ. Регистрация импульсов осуществляется отдельно в трех диапазонах амплитуд, соответствующих энергиям альфа-частиц

соответственно RaA , RaC' и TnC' . По результатам, полученным при подсчете импульсов, и с учетом параметров отбора и измерения пробы вычисляются значения ОА ДПР, значения ЭРОА и коэффициента равновесия между ДПР, которые выводятся на экран.

Измерение ОА радона-222 основано на электростатическом осаждении заряженных ионов ^{218}Po (RaA) из отобранной пробы воздуха на поверхность ППД. ОА ^{222}Rn определяется по количеству зарегистрированных альфа-частиц при распаде атомов RaA , осевших на ППД. Измерительная камера блока измерения ОА выполнена из пластика и представляет собой пустотелый цилиндр с расположенным внутри высоковольтным электродом и герметично закрытыми фланцами с двух сторон (рис. 26).

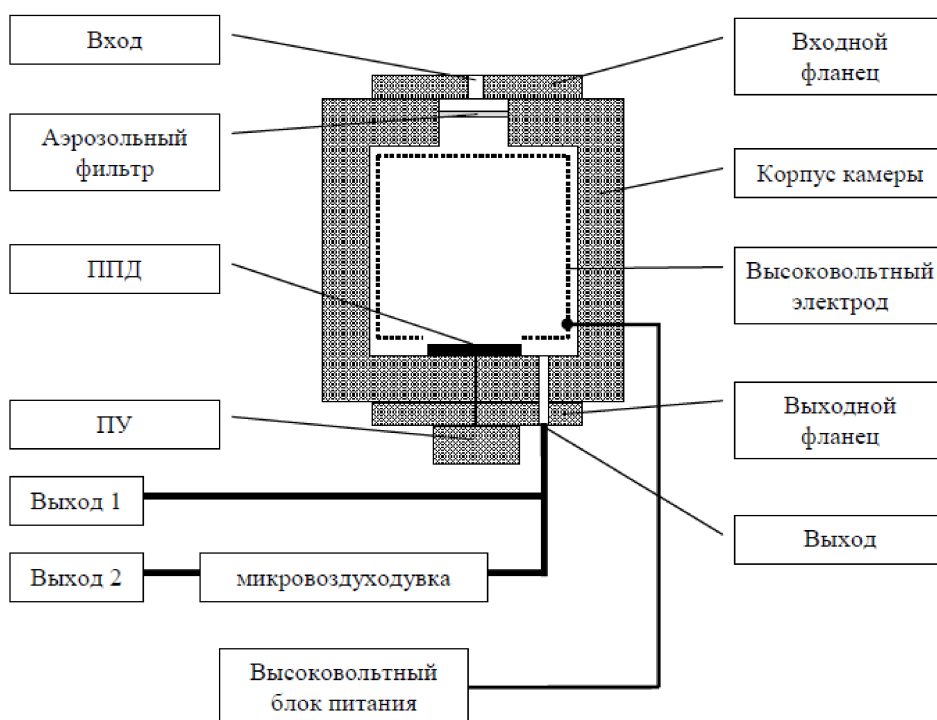


Рис. 26 – Измерительная камера блока измерения ОА

На входном фланце установлен фильтродержатель с аэрозольным фильтром, а на внешней поверхности размещен входной штуцер. В центре выходного фланца установлен ППД с ПУ, сигнал с которого поступает на БУ. Все электронные блоки аналогичны тем, которые использованы в блоке измерения ЭРОА. Отбор пробы воздуха в измерительную камеру

осуществляется с помощью микровоздуходувки. Проба воздуха через защитный аэрозольный фильтр поступает в измерительную камеру, проходит через климатическую камеру и поступает в микровоздуходувку. Защитный аэрозольный фильтр используется для очистки контролируемого воздуха от дисперсной фазы аэрозолей и, в том числе, от ДПР радона и торона, находящихся в воздухе.

Радиометр радона Markus-10 (Швеция) имеет похожую измерительную схему, но рассчитан только на определение активности радона в почвенном воздухе (рис. 27). Отбор проб проводится при помощи измерительного зонда, вставляемого в грунт. Конструкционно, зонд – труба с свинчивающей сверху насадками. При углублении зонда в почву используется насадка в виде массивного набалдашника с внутренней резьбой. После того, как зонд достигает нужной глубины погружения, в верх трубы навинчивается насадка с гидравлическим уплотнением. К этой насадке присоединяется радиометр радона. Первая фаза измерений - закачка воздуха в детекторную камеру, длящаяся до достижения необходимого давления в камере. Вторая фаза – измерительная. Измерение не проводится, если не удастся отобрать необходимое количество воздуха. Новое измерение проводится через 18 мин. Результат измерений выводится на жидкокристаллическое табло в кБк/м³.



Рис. 27 – Радиометр радона "Маркус-10"

Радиометры аэрозолей радона и торона. Группа радиометров аэрозолей радона и торона насчитывает несколько распространенных моделей: "РАМОН-01", РГА-01Т, РАА-02,

"ОНЕГА-М", РЗА-04 "Омега".

В этих радиометрах (рис. 28) используются следующие обязательные операции:

- отбор проб воздуха на аэрозольные фильтры;
- регистрация α - и/или β -активности осевших на фильтрах аэрозолей радионуклидов в течение времени Δt . В зависимости от количества измерительных циклов Δt различают одноточечные или двухточечные методы.



Рис. 28 – Бета, гамма-спектрометрический анализатор аэрозолей «Жасмин»

Нижний предел диапазона измерений общей активности аэрозолей дочерних продуктов радона для большинства систем измерения обычно составляет 10-20 Бк/м³; дальнейшее снижение его требует увеличения расхода воздуха при одновременном снижении удельного сопротивления фильтра, увеличения эффективности регистрации излучения ДПР и т.д., что обычно связано с существенными конструктивными сложностями. С другой стороны, для практических работ этого, как правило, почти всегда бывает достаточно [5].

Непрерывные мониторы радона (CRM). Радоновые мониторы представляют собой средства измерений, в которых реализован принцип регистрации и измерений объемной активности радона в воздухе в течение длительного времени.

Существует несколько типов стандартных устройств монитора радона с использованием различных типов датчиков, в том числе сцинтилляционных, токовых или импульсных камер ионизации и твердотельных силиконовых детекторов. CRM собирают воздух для анализа с помощью небольшого насоса или позволяют воздуху свободно диффундировать в камеру датчика. Все устройства CRM оснащены электрической пересчетной схемой, часто с временной фиксацией записи, что позволяет вычислять интегральную концентрацию радона в различные периоды времени. Различные типы устройств имеют свои специфические преимущества. Например, при использовании твердотельных кремниевых детекторов возможна альфа-спектрометрия, что позволяет проводить дискриминацию между радоном и тороном. Некоторые устройства позволяют устранять перекрестную чувствительность к влажности воздуха путем сушки поступающего воздуха. Как правило, порог чувствительности этих устройств составляет около 5 Бк/м³. Устройство CRM требует проведения рутинных калибровок для обеспечения надлежащего функционирования.

Аппаратурный парк непрерывных мониторов радона представлен линейкой AlphaGUARD Mod.PQ2000 производства фирмы Genitron Instruments GmbH (Германия) (рис. 29), “Atmos-12D” (Швеция), “PRASSI Mod.5S” фирмы Silena; квазимониторы: “Mod.4S” фирмы Silena, радиометр “SARAD EQF 3020” немецкой фирмы “SARAD GmbH” [5].



Рис. 29 – Непрерывный монитор радона AlphaGUARD (saphymo.de)

Непрерывные мониторы торона (СТМ) работают с технологией электростатического сбора заряженных продуктов распада радона на твердотельный кремниевый детектор и последующим обнаружением альфа-спектрометрией. Однако значительная неопределенность измерения может быть результатом неспособности адекватно откалибровать детектор для такой короткоживущей эманации как торон. Кроме того, определенную неопределенность вносит перекрытие энергий при альфа-распад ^{212}Bi (дочернего продукта торона) с энергией 6,0 МэВ от ^{218}Po .

Поскольку концентрация торона в помещении не является однородной, репрезентативность многих измерений трудно установить. Поэтому прямое определение торона продуктами распада еще более важно, чем непосредственно измерение радона. В связи с длительным периодом полураспада продукта распада ^{212}Pb (10,6 ч) по сравнению с тороном (56 с),

концентрация продуктов распада торона внутри помещений менее неоднородна.

Пассивные детекторы радона. Альфа-трековые детекторы (ATD) - небольшие фрагменты специального пластика помещаются в диффузионную камеру, в которой предусмотрено исключение проникновения внутрь продуктов распада радона (рис. 30-32). Материал пластика - полиаллиловый карбонат дигликоля (PADC или CR-39), нитрат целлюлозы (LR-115) или поликарбонат (Makrofol).

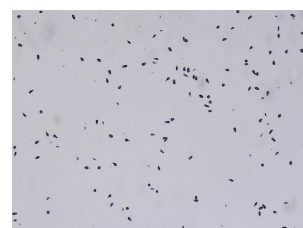
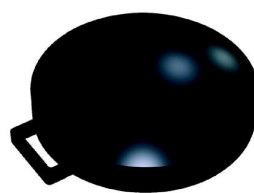
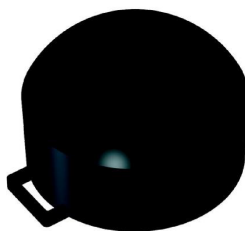


Рис. 30 – Детектор радона пассивного типа NRPB/SSI (CR39)

Рис. 31 – Детектор торона

Рис. 32 – Альфа-треки радона и его ДПР

[97]

Альфа-частицы, образовавшиеся при распаде радона или его дочернего продукта распада, повреждают материал детектора в виде микроскопических областей - скрытых альфа-треков. Химическое или электрохимическое травление пластикового материала детектора увеличивает размер альфа-треков, делая их видимыми для оптической микроскопии, что в свою очередь позволяет их пересчитывать вручную или автоматически. Количество дорожек на единицу поверхности, после вычитания фона, прямо пропорционально общей концентрации радона (рис. 31). Коэффициенты перевода позволяют пересчитать плотность треков в концентрацию радона (обычно выраженную в Бк/м³) [55, 91].

Альфа-трековые детекторы, как правило, размещают для экспозиции от 1 месяца до 1 года. Они нечувствительны к влажности, температуре, к естественному β - и γ -фону. Пыль и электростатика понижают их надежность. Измерения детекторами, произведенные на больших высотах (свыше 2000

м), могут потребовать некоторых коррективов в связи с различиями в плотности воздуха, влияющими на прохождении в нем альфа-частиц. Перекрестную чувствительность детекторов к торону можно избежать установлением диффузионной камеры с большим сопротивлением диффузии на газ, поступающий в камеру. Минимальная определяемая концентрация - от 30 Бк/м³ на 1 месяц экспозиции [89].

Детекторы на основе адсорбции радона активированным углем (ACD). В приборах ACD используется свойство активированного угля поглощать газы. Принцип обнаружения радона этим методом - адсорбция радона активированным углем с последующим измерением отобранной пробы.

Обычно детекторы с активированным углем используют для измерения активности радона в помещениях, где больше всего проводят времени жители (спальни, гостиные и т.д.).

Вследствие того, что ACD отзывчиво на влажность, они должны быть откалиброваны в соответствии с различными уровнями влажности, в разных диапазонах длительности экспозиции и температуры. Диапазоны длительности и температуры должны выбираться максимально близкими к полевым условиям.

Вследствие того, что в устройствах ACD происходит перемешивание активированного угля, что сопровождается адсорбцией и десорбцией радона, калибровочные значения не могут быть постоянными, поэтому метод обеспечивает хорошие оценки содержания радона при значениях экспозиции в случае, если концентрации радона низкие.

Детектор на основе активированного угля выполнен в виде коллектора из нержавеющей стали диаметром 8 см и высотой 2,4 см.

Детектор снабжается диффузионным барьером, который делает его нечувствительным к торону. Использование диффузионного барьера уменьшает эффекты смещения и высокой влажности. В коллекторе имеется отверстие диаметром 4 см, покрытое фильтром из пористой нержавеющей стали толщиной 0,318 см. Этот фильтр выполняет функцию гидрофобного покрытия, предотвращая попадание влаги в коллектор. При наличии фильтра поглощение влаги уменьшается

в 10 раз.

В коллекторе размещается навеска активированного угля (25 г).

Детекторы на основе активированного угля (рис. 33) перед размещением в точках опробования открывают. Экспозиция обычно составляет 1-7 дней. После экспозиции, детектор запечатывают с помощью алюминиевой фольги. Алюминиевая фольга препятствует утечке радона и имеет слабое поглощение гамма-излучения. После 3-часового периода ожидания, по достижению равновесия продуктов распада радона с собранным радоном, собранные пробы измеряют с помощью гамма-спектрометрии по ДПР (например ^{214}Pb) или с альфа-подсчетом.

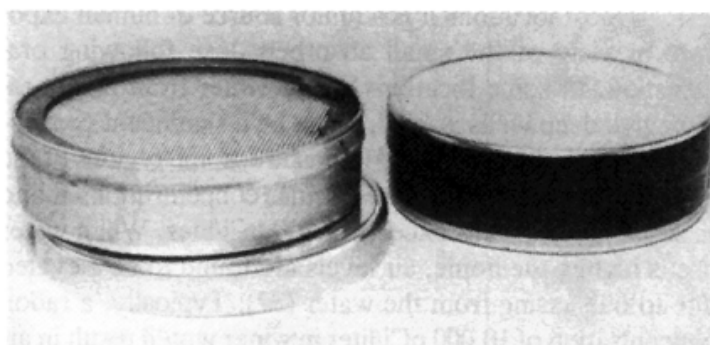


Рис. 33 – Пассивный детектор радона с активированным углем

Детектор с активированным углем может быть изготовлен в виде небольшой емкости покрытой экраном. Активированный уголь содержится в пространстве под экраном, который удерживается кольцом. При начале экспозиции его удаляют, а по окончании всю емкость помещают для анализа.

Малые навески активированного угля и короткий период полураспада радона обуславливают необходимость оперативного анализа.

Применение жидкостного-сцинтиляционного счетчика позволило в 100 раз уменьшить количество используемого активированного угля (до 5 г).

Для реактивации детектора прогревают при температуре 110°C , при которой происходит десорбция радона.

Электретные ионные камеры (EIC). Электретные ионные камеры являются пассивными интегральными устройствами, измеряющими среднюю концентрацию радона в течение периода

измерения (рис. 34). Электрет одновременно служит источником электрического поля и датчиком. Радон (но не продукты распада радона) поступают в ионную камеру путем пассивной диффузии через фильтрующее устройство на входе. Излучение радона и продуктов его распада внутри камеры ионизирует воздух. Отрицательные ионы собираются на положительном электрете, расположенном в нижней части камеры. Разрядка электрета за известный промежуток времени является мерой время-зависимой ионизации, а она, в свою очередь, связана с концентрацией радона. Разрядка электрета измеряется в вольтах с помощью бесконтактного электретного считывающего устройства. Эта величина совместно с длительностью и калибровочным фактором дает концентрацию радона.

Типичные краткосрочные электретные устройства предназначены для измерения радона для 2 до 15 дней при концентрациях радона 150 Бк/м³. Долгосрочные электретные устройства измеряют концентрацию радона на протяжении от 3 до 12 месяцев при концентрациях 150 Бк/м³. Эти устройства используются в различных странах и показывают превосходную точность при соблюдении стандартных операционных процедурных (поправок на фон гамма-излучения, сохранения электретов от поступления пыли и т.д.).



Рис. 34 – Пример радонового детектора "электретной ионной камеры" и считывающего устройства

Электронное интегрирующее устройство (EID). Большинство устройств EID используют твердотельный силиконовый детектор в диффузионной камере для подсчета альфа-частиц, испускаемых продуктами распада радона. Из-за малых размеров диффузионной камеры длительное время интеграции (>2 дня) часто является необходимым условием для получения статистически устойчивого значения при умеренных уровнях концентрации радона. Повышенная чувствительность может быть достигнута путем прикладывания высокого напряжения для сбора заряженных продуктов распада радона электростатическим путем прямо до детектора. Высокая влажность воздуха может влиять на измерение. Чувствительность EID - 20 Бк/м³ при 7-дневной экспозиции.

Жидкостно-сцинтилляционный счетчик. Жидкостно-сцинтилляционный счетчик (LSC) является наиболее чувствительным и широко используемым методом для измерения радона в воде. Популярность жидкостной сцинтилляции для анализа радона лежит в ряде характеристик, включая высокую точность, высокую чувствительность, ограниченную потребность для пробоподготовки, способность быстро измерить большое количество образцов. Вследствие высокой растворимости радона в органических растворителях, правильно отобранные образцы воды могут быть непосредственно добавлены к сцинтилляционной смеси (толуол, ксилол или минеральное масло) с образованием двухфазной водной/органической системы. Радон будет распределяться между вода/сцинтилляционной смесью и воздушным пространством во флаконе и станет доступным для измерения методами LSC. Технология LSC позволяет количественно определять активность радона и продуктов распада от скорости фотонов, испускаемых ими в сцинтилляционной жидкости.

Табл. 11 – Характеристика детекторов радиоактивных эманаций

| Тип детектора | Аббревиатура | Пассивный / активный | Диапазон | Способ измерений | Измеряемая величина | Неопределенность, % | Длительность отбора пробы | Стоимость | Устройство |
|--|--------------|----------------------|---|-------------------|---------------------------|---------------------|--|--------------------|---|
| Альфа-трековый детектор | ATD | Пассивный | 200 – 300 10 ⁵ *сутки | Интегральный | ОА радона в воздухе | 10-25 | 1-12 месяцев | Низкая | Трековый комплекс КСИРА 2010Z («Радон-Сервис», РФ), трековый комплекс ТРЕК-РЭИ-1 («НИИЦ-РБ КО», РФ) |
| Детектор на активированном угле | ACD | Пассивный | 40 - 2·10 ⁵ Бк/м ³ | Квазиинтегральный | ОА радона в воздухе | 10-30 | 1-7 дней (от 10 БК/м ³) | Низкая | Многофункциональный комплекс «Камера» (НИТОН, РФ) |
| | | | | | | 30 | | | |
| Электретная ионная камера | EIC | Пассивный | | Интегральный | ОА радона в воздухе | 8-15 | 5 дней - 2 года | Средняя | Rad Elec, Inc. (США) SPER-1, SPER-2 (SST) |
| Электронное интегрированное устройство | EID | Активный | | Интегральный | ОА радона в воздухе | 25 | 2 дня - годы | Высокая Средняя | РГА-04 («НТМ-Защита», РФ), Pro Series 11 (SafetyStren, США) |
| Двойной трековый детектор | DTD | Пассивный | | Интегральный | ОА торона в воздухе | 25 | 3-12 месяцев | Низкая | |
| Метод 2 фильтров | TFM | Активный | | Дифференциальный | ОА торона в воздухе | 10 | 10 часов | Высокая | |
| Радиометр радона | | Активный | 4 - 5·10 ⁵ Бк/м ³ | Дифференциальный | ОА аэрозолей ДПР и ДПТ | 30 | n·мин | Высокая | РАМОН-01 (разработка ВНИИФТИ; МЧП «Соло», РФ) |
| | | | 15 - 2·10 ⁵ | | | 25 | | | «РАА-02» (НИИРГ, РФ) |

| Тип детектора | Аббревиатура | Пассивный / активный | Диапазон | Способ измерений | Измеряемая величина | Неопределенность, % | Длительность отбора пробы | Стоимость | Устройство |
|--|--------------|----------------------|---|------------------|--|---------------------|---------------------------|--|---|
| | | | Бк/м ³ | | | 30 | | | «РГА-01Т» (НИИРиММ, РФ), РГА-500 (ВИРГ «Рудгеофизика», РФ); РРА-10 («НТМ-Защита», РФ) |
| Монитор радона и аэрозолей ДПР в воздухе | CRM STM | Активный | 20 - 2·10 ⁴ Бк/м ³ (²¹⁸ Рo); 0 – 10 ³ Бк/м ³ (²¹⁶ Рo); | Дифференциальный | ОА радона в воздухе | 30 | <i>n</i> -мин | Высокая | РРА-01М, «Альфарад Плюс» МТМ («НТМ-Защита», РФ)) |
| | | | | | ОА торона в воздухе | 30 25 | <i>n</i> -мин | | РЗА-04 «Омега» (ВИРГ “Рудгеофизика”, РФ), “Atmos -12D (DPX)” (Швеция), “PRASSI Mod.5S” (Silena , “SARAD GmbH”, Германия); RadStar (AccuStar, США) |
| | | | | | ОА радона в воздухе+аэрозольный модуль | | | AlphaGUARD PQ2000-T&N (“Genitron”, Германия); “PRASSI Mod.5S”, “SARAD EQF 3020”, (Silena , “SARAD GmbH”, Германия); “TN-WL-02” (“Thomson&Nielsen Electronic Ltd.”, Канада) | |

2.9 Мониторинг радона и продуктов его распада в воздухе помещений

Мониторинг радона и продуктов его распада в воздухе жилых помещений одна из важнейших задач, которая позволяет получить объективную количественную информацию о состоянии радоноопасности конкретного объекта. Для создания технологической системы мониторинга привлекаются как радиометрические средства измерения, так и другие технические средства. Типовые схемы создания технологических систем радонового мониторинга приведены из [5], где (рис. 35, 36), как правило, представлены два блока устройств 1) датчик радона в почве и 2) измеритель потока радона из почвы.

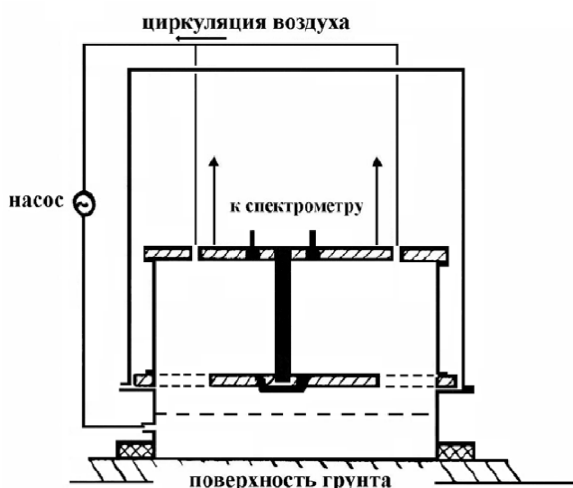


Рис. 35 – Измерение концентрации радона в почве с помощью ионизационной камеры

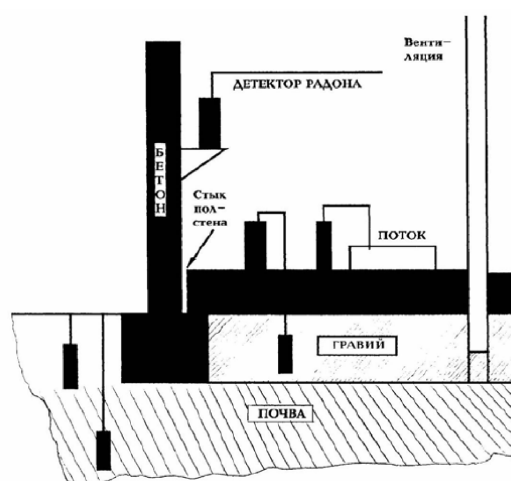


Рис. 36 – Схема измерения радона в жилом помещении и окружающей среде (под строением, в почве вблизи строения, конструктивных элементах здания)

Наилучший вариант опробования – размещение измерительных скважин вокруг зданий, под зданием и в типичном для данной местности грунте.

3. ЭМАНАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ В ГЕОЛОГИИ

3.1 Поисковый эманационный метод

Эманационный метод – измерения активности эманаций в почвенном воздухе основан на изучении концентрации радиоактивных эманаций [1, 3, 11, 19]. Обычно измерение количества радона проводят путем сравнения активности пробы и эталона. Предел чувствительности радонового эманационного метода составляет 10-15 кюри радона.

Осуществляют перевод пробы воздуха с радон в измерительную камеру, причем момент окончания поступления радона в камеру записывают. Затем в течение 3 часов измеряют ионизационный ток (либо скорость счета), создаваемый α -частицами радона и продуктами его распада. Вначале ток растет быстро, а потом медленнее, достигая максимума через 3 ч, когда наступает равновесие между радоном и продуктами его распада.

Наибольшего распространения эманационный метод достиг в геофизических работах (т.н. эманационная съемка ЭС) при крупномасштабных поисках урана и тория на участках, закрытых рыхлыми отложениями мощностью до 5-8, иногда до 10 м. Чаще всего ЭС применяется для определения эманаций в почвенном воздухе; также используется для прослеживания тектонических нарушений, для прогноза землетрясений, определяя рост во времени интенсивности эманаций. Преимущество эманационного метода - относительно высокая глубинность исследования, а недостаток - резкое падение глубинности и эффективности в условиях малопроницаемых, сильно увлажненных и мерзлых грунтов.

Благоприятной для проведения ЭС является местность со сглаженным рельефом с чехлом наносов 1-10 м при наличии сухих рыхлых отложений, проницаемых для газа. Наибольшая влажность этих наносов значительно уменьшает глубинность ЭС. Эманации отбираются лишь из отложений, залегающих выше уровня подземных грунтовых вод.

Неблагоприятными для проведения ЭС являются мощные морено-ледниковые наносы, мерзлые грунты, вечная мерзлота,

каменные потоки (курумы) и осыпи, а также районы с сухими и жарким климатом [45].

В ЭС различают обычную (приповерхностную) и глубинную съемку. В первом приближении пробу для анализа отбирают с глубины 0,8-1 м, во втором - из шурфов глубиной от 1,5 до 10 м и более, проходимых с помощью самоходных буровых установок.

Объемная активность эманаций a в порых в бесконечной однородной среде определяется соотношением:

$$a = a_{mx} \delta k_{\varepsilon} / k_n \quad (3.1)$$

где a_{mx} – удельная (массовая) активность радиоактивного элемента, из которого образуется эманация;

k_n – коэффициент пористости в долях от объема породы;

δ – плотность породы.

Если a_{mx} выразить в беккерелях на грамм, то значение a получим в беккерелях на кубический сантиметр. Формула (1) в применении к почвенному воздуху пригодна для оценки концентрации эманаций лишь на достаточно большой глубине, где отсутствует влияние утечки в атмосферу.

По мере удаления от рудного тела или другого источника эманаций их концентрация убывает тем быстрее, чем больше постоянная распада λ и чем ниже коэффициент диффузии эманаций в породе D_B .

Решение уравнения диффузии газа в предположении, что мощность наносов значительно больше, чем расстояние x от активного пласта до точки измерения, приводит к формуле:

$$a = a_0 \exp\left(-x \sqrt{\frac{\lambda}{D_B}}\right) \quad (3.2),$$

где a_0 – активность эманаций в кровле активного пласта.

Вблизи дневной поверхности отношение a/a_0 в действительности убывает быстрее, чем это следует из формулы (ф. 2), вследствие интенсивной утечки эманаций в воздух и на границе с воздухом становится почти равным нулю.

С учетом обычной глубины отбора проб (0,8-1 м) глубинность съемки по радону при принятой активности пласта составит 3,5 м от земной поверхности, а в рыхлых отложениях с

высоким коэффициентом D_B до 6-7 м. Глубинность съемки по Tn и An практически совпадает с глубиной отбора проб. При наличии механических и солевых ореолов глубинность метода возрастает.

Основным фактором определяющим глубинность съемки для данного изотопа, является коэффициент диффузии D_B . При уменьшении пористости, проницаемости и влажности пород и почв D_B снижается от $7 \cdot 10^2$ до $(2-3) \cdot 10^{-4}$ см/с. Именно низким значением D_B обусловлена неэффективность эманационных поисков в условиях заболоченности, вечной мерзлоты, в моренных отложениях, а также частично на обнажениях плотных коренных пород с низкой проницаемостью. Наиболее благоприятны для проведения эманационной съемки площади развития рыхлых отложений однородного состава с относительно постоянной мощностью (в пределах 1-5 м) и небольшим колебанием нормального эманационного поля. Последнее в зависимости от содержания U и Th в породах и наносах, значений $k_э$, $k_п$ и влажности может изменяться от 5-10 до 60-80 Бк/л. При мощности малопроницаемых наносов (пород) более 1,5-2 м обычные эманационные методы малоэффективны, и вместо них используют глубинные поиски.

В случае, когда ореолы рассеяния урана скрыты большой толщей наносов и не фиксируются показаниями обычной ЭС, применяют ее глубинный вариант. При глубинной ЭС отбор эманаций производится без перекрытия шпуров (при сильном эманировании пород) и с перекрытием (при слабом эманировании пород). В последнем случае для отбора эманаций применяются специальные пакер-зонды. С их помощью эманацию отбирают также из скважин.

Методика эманационных исследований. Эманационный метод поисков урана или эманационная съемка, предназначен для поисков газовых (радоновых) ореолов рассеяния, создаваемых вокруг урановых рудных тел и ореолов рассеяния урана и радия [1, 11, 19, 23, 28].

Эманационный метод используется при сравнительно детальных поисках и детализации аномалий, обнаруженных гамма-методами. Он является более глубинным, чем

поверхностные методы и позволяет обнаруживать урановое оруденение при мощности наносов, не содержащих механических или солевых ореолов, от 1 до 3 м, в некоторых случаях - до 5 м. Если в рыхлых отложениях имеются четко выраженные солевые уран-радиевые ореолы рассеяния, глубинность эманационного метода увеличивается в соответствии с величиной ореола. Основную роль в формировании газового ореола играет газопроницаемость перекрывающих оруденение наносов. Если мощность экранирующих радон отложений (глины, сильно увлажненные грунты) превышает 1,5-2 м, постановка обычной эманационной съемки не эффективна. Благоприятными для проведения эманационной съемки являются сухие, не заболоченные участки с мощностью достаточно пористых наносов в пределах 1 - 5 м. Выходы коренных пород, каменные осыпи, болота не пригодны для постановки эманационного метода.

В геологии широким распространением пользуется определение концентрации эманаций в почвенном воздухе. Для проведения этих работ по заранее намеченным точкам механическим или ручным способом пробивают шпур глубиной 0,8-1 м. В шпур устанавливают пробоотборник, соединенный через шланг с пылеуловителем и камерой эманометра, насосом прокачивают почвенный воздух через эманационную камеру.

Шпуры пробиваются по сетке с заданной плотностью в зависимости от масштаба работ. При поисковой съемке расстояние между профилями равно 250 м (масштаб 1:25000) или 100 м (масштаб 1:10000). Расстояние между точками по профилю составляет 5-10 м. Детальная эманационная съемка проводится по сетке 50x5 м (для масштаба 1:5000) и 20x2 м (для масштаба 1:2000).

В процессе эманационной съемки измерения проводятся сразу же после введения почвенного воздуха в эманационную камеру. Обычно измеряют через 15-20 с после отбора воздуха (мгновенный отсчет $t=0$). Для определения природы аномалий на каждой десятой точке проводят дополнительное измерение через 1 мин (одноминутный отсчет), а при выявлении аномалий - также через 2 и 3 мин после введения пробы (двух- и трехминутные отсчеты, $t=3$).

Расчет радона и торона можно проводить по формулам:

$$Rn=1,5(I_1-0,5I_0)j \quad (3.3)$$

$$Rn=(I_2-0,2I_0)j \quad (3.4)$$

$$Rn=0,8(I_3-0,1I_0)j \quad (3.5)$$

$$Tn=I_0j-Rn, \quad (3.6)$$

где Rn , Tn – концентрация радона и торона в почвенном воздухе; j – коэффициент эталонирования прибора; I_0 , I_1 , I_2 , I_3 – показания прибора при мгновенных, одно-, двух- и трехминутных отсчетах. Точность определения радона по этим формулам составляет 15-20%, торона – 30-40 %, что вполне удовлетворительно для поисковой практики.

В современных эманометрах время экспозиции и вывод результатов с пересчетом в Бк/м³ или Бк/л заложено в пересчетной схеме радиометра, а также можно задать вручную оператором.

Точность определения радона из этой системы уравнений составляет 15-20%, торона 30-40%, что приемлемо для решения поисковых задач. Определение объемной активности подпочвенного радона и торона радиометром альфа-активных газов РГА-01 «Глициния», в диапазоне измерений от $0,2 \cdot 10^2$ до $3,15 \cdot 10^8$ Бк/м³, формирует погрешность не выше 5-30 %. Приблизительно такую же характеристику имеет "Альфарад Плюс": погрешность измерений составляет $\pm 30\%$ для диапазона $0,1 \div 2,0 \cdot 10^6$ Бк/м³.

Из-за накопления в камере дочерних продуктов распада эманаций показатели эманометра после отбора пробы изменяются во времени сложным образом. При малых временах измерений t_1 и t_2 , использующихся на практике ($t_1, t_2 \ll T_{Rn}$, где T_{Rn} – период полураспада радона), показания i_1 и i_2 при t_1 и t_2 связаны с концентрацией радона и торона соотношением:

$$p_k a_{Rn} a_{Tn} \exp(-\lambda_{Tn} t_k) = i_k \varepsilon_0 \quad (3.7),$$

где λ_{Tn} постоянная распада торона; ε_0 – чувствительность эманометра (в Бк/л на 1 деление): p_1, p_2 – коэффициенты нарастания отсчетов, обусловленные накоплением в камере дочерних α – излучающих продуктов распада радона. Они находятся по специальным номограммам.

Для определения природы эманации в каждой десятой-

пятнадцатой точке проводят повторное измерение через минуту после введения радона в камеру. Определяют отношение радона к торону $\varepsilon = \frac{Rn}{Tn}$; параметр ε служит критерием отбраковки аномалий. Если соотношение $\varepsilon = Rn/Tn > 1,5$, то эманационное поле считают существенно радоновым, при $\varepsilon < 0,5$ - существенно тороновым, при $0,5 < \varepsilon < 1,5$ - смешанным.

Обычно тороновые аномалии отбраковывают как бесперспективные уже на первом этапе детальных поисков. Глубинные эманационные поиски выполняются в неглубоких скважинах, пробуренных специальными буровыми агрегатами, применяемыми при глубинной гамма-съемке, и используются в качестве дополнительного метода поисков.

В начале и конце рабочего дня контролируют работу аппаратуры с помощью специальных эталонных камер. Кроме того, проводят контрольные замеры в части точек, исследованных ранее. При обнаружении аномальных показаний оператор проводит детализацию и дополнительное изучение аномалии. На аномальных участках проводят 2-3 измерения на каждой точке: непосредственно после введения радона, через 2 мин и через 3 мин. Первичная детализация выявленной аномалии заключается в ее проверке и оконтуривании по дополнительным коротким профилям, отстоящим друг от друга на 10-25 м.

Точки с максимальными показаниями отмечаются на местности турами, кольями, вехами, затесами на деревьях и т.д.

После оконтуривания, подтверждения аномалии и установления ее природы эманационным методом начинается второй этап детализации. Этот этап включает в себя детальное геологическое картирование участка, шпуровую гамма- и гамма-бета-съемку, металлометрическое опробование рыхлых отложений на содержание урана и его элементов-спутников с последующим вскрытием аномалии горными выработками.

За нормальный фон принимаются концентрации радона и торона в почвенном воздухе от $5 \cdot 10^{-15}$ до $5 \cdot 10^{-14}$ %, а за аномальные – до $5 \cdot 10^{-13}$ и $5 \cdot 10^{-12}$ % [21].

Для геологических целей менее распространен вид ЭС с отбором проб почвенного воздуха. Задачи, ранее решаемые

подобным методом, часто решают по данным глубинной и спектральной γ -съемок, а также *эманационно-трековым методом* (ЭТМ).

Детектор ЭТМ – диэлектрическая пленка, помещенная в специальных перфорированных кассетах, опускают в шпур глубиной 0,5-0,9 м и оставляют там на экспозицию 25-30 дней. Внутри кассеты за счет распада Rn, Tn и An, попадающих туда с почвенным воздухом, образуются α -частицы и оставляют на пленке невидимые треки (нарушения). После химического травления и высушивания пленки под оптическим микроскопом подсчитывают число треков, которое при прочих равных условиях пропорционально α -активности почвенного воздуха. При экспозиции 30 дней фоновая плотность треков обычно 30-150 на 1 мм². Аномальными считаются пленки с трехкратным превышением плотности треков над фоновой.

Преимущество ЭТМ - интегрирование показаний в течении длительного времени, вследствие чего исключаются суточные вариации концентрации радона в почвенном воздухе, которые могут достигать десятикратных значений. Это намного повышает чувствительность и глубинность метода.

По показаниям эманометра при двух временах вычисляют концентрации радона и торона к моменту отбора пробы почвенного воздуха. Полученные результаты изображают в виде планов-графиков концентрации эманаций по профилям, на которые наносят схематическую геологическую основу. По результатам детальных работ на аномалиях строят карты изоэман, графики распределения Rn и Tn по разрезу скважин и шпуров. При обработке ЭТМ на графики и карты наносят плотность треков. На этих картах и графиках выделяют эманационные аномалии, в которых показания превышают нормальный фон не менее чем на два-три значения среднего квадратического отклонения. Если превышения коррелируются на нескольких соседних профилях, то в качестве аномальных выделяют и меньшие превышения над нормальным фоном. Одним из способом статистического метода выделения аномалий является усреднение фактических значений ОА скользящим окном, включающим 3 замера. Такая методика решает две

основные задачи: 1) с помощью больших окон усреднения (5-7 точек измерения) происходит генерализация значений ОА радона и торона, что 2) позволяет уверенно определять участки (зоны) с аномальными уровнями концентраций радиоактивных газов.

Причиной эманационных аномалий кроме рудных тел под наносами, механических и солевых ореолов может быть повышенное эманирование пород нормальной активности (аномалии эманирования) или скопления радона и торона под газонепроницаемыми прослоями (аномалии экранирования).

Содержание урана и γ -активность в рудных аномалиях закономерно повышаются с глубиной, в механических ореолах происходят резкие их колебания. Для аномалий эманирования и экранирования характерны нормальные γ -поле и содержание урана в наносах. Ореольные аномалии характеризуются широким площадным распределением и изометрической формой. Площадное распространение имеют и рудные аномалии. Для аномалий экранирования характерно локальное распространение. Аномалии эманирования имеют различную форму, часто линейную (вытянутую), соответствующую зонам тектонического дробления и трещиноватости.

Наиболее перспективные аномалии, которые могут быть связаны с урановым оруденением, характеризуются следующими признаками: сравнительно высокими концентрациями эманаций (не менее 10^2 - 10^3 Бк/л), отчетливо выделяющимися по нескольким профилям в виде аномальной полосы; существенно радоновой или смешанной (реже) природой эманаций; увеличением концентрации эманации и интенсивности γ -излучения с глубиной; наличием аномальных концентраций урана в пробах рыхлых отложений и коренных пород; видимой урановой минерализацией; приуроченностью аномалий и пород с аномальной радиоактивностью к благоприятным структурам, горизонтам, зонам дробления, трещинам и т.д.

Задача. Оценивание глубинности эманационной съемки. Формула (2) позволяет приближенно оценить глубинность эманационной съемки. Предположим (это близко к действительности), что чувствительность прибора, а также колебания нормального фона таковы, что можно обнаружить повышение эманаций по сравнению с нормальным фоном на

$a_{\min}=40$ Бк/л. Пусть концентрация урана в пласте $10^{-2}\%$ (активность R_a $a_{Ra}=1,1$ Бк/г); $k_3=0,1$; $k_n=0,1$; $\delta=2,3$ г/см³. Тогда концентрация радона a_0 в поровом пространстве согласно формуле (1) будет $a_0=a_{Ra}\delta k_3/k_n =3$ Бк/см³ $=3\cdot 10^3$ Бк/л.

Подставляя эту величину, а также типичное значение $D_B=10^{-2}$ см²/с в формулу (2), находим, что концентрация $a_0=40$ Бк/л достигается на расстоянии: $x=0,43/\sqrt{\lambda}$

Расчеты для Rn ($\lambda=3,05\cdot 10^{-6}$ с⁻¹) дают $x=250$ см, а для Tn и An 3,1 и 1,1 см соответственно.

Методика эманационных исследований плотности потока радона (ППР). Главным образом измерения ППР находят место при инженерно-геологических изысканиях под строительстве нового или реконструкции уже существующих зданий. Во многих станах, работы по измерению ППР включены в строительные нормативы. Главным источником радона формирующего потоки радона является грунт.

В грунтах, представленными мелкодисперсными осадочными породами, перенос радона в основном происходит вследствие его диффузии. Конвективный перенос практически отсутствует. Поэтому при максимальной, реальной для осадочных пород длине диффузии, равной 1,9, достигающей внешней границы поверхностного слоя, поток радона формируется в слоях, суммарная толщина которых (толщина "активного слоя" составляет около 10 метров.

При низких и средних значениях длины диффузии радона толщина "активного слоя" грунта составляет от 1 до 6 м, что соизмеримо, и часто меньше, чем величина заглубления здания.

Необходим учет целого ряда факторов, который вносят неопределенность в измерения ППР:

- 1) наличие почв, содержащих органику, или насыпные грунты техногенного происхождения, характеристики которых, в том числе и газопроницаемость, значительно отличаются от коренных грунтов;
- 2) малая глубина залегания грунтовых вод;
- 3) большая глубина заложения фундамента;
- 4) существенная разница в минералого-геохимических свойствах отдельных слоев горных пород.

Наиболее достоверная оценка радоноопасности стройплощадок получается при измерении плотности потока радона на отметках заложения подошвы фундамента, что позволяет решить вопрос о необходимости применения дополнительных эффективных мер противорадоновой защиты.

Для определения степени радоноопасности площади застройки на первом этапе используют среднеарифметическое значение плотности потока радона с учетом относительной погрешности его оценки (с доверительной вероятностью $P=0,95$), связанной с вариациями отдельных измерений ППР по площади.

По этим результатам принимают решение о необходимости измерения ППР на нижней отметки фундамента; введения поправочного коэффициента за возможное изменение ППР после начала эксплуатации здания, изменения режима вентиляции, характеристик грунта и т.д.

Результаты измерений эксгаляций радона с поверхности земли показывают, что интенсивность выделения радона с поверхности земли зависит от наличия или отсутствия в недрах под площадкой разлома, содержания радия-226 в грунтах, значений коэффициента эманирования, литологии грунтов. Определенный вклад при выделении радона с поверхности грунтов вносит скорость фильтрационного переноса радона, обусловленного миграцией к поверхности земли паров воды и других газов [29].

Практические измерения ППР показали их зависимость от метеорологических факторов, сезона. Средние значения ППР отвечают логнормальному закону распределения, а коэффициенты вариации во времени значений ППР в отдельных пунктах находятся в пределах 0,3-0,4. Коэффициент вариации среднего значения ППР по этим пунктам оказался равным 0,2.

3.2 Радиогидрохимический метод поисков

Радиогидрохимический метод поисков предназначен для выявления водных ореолов рассеяния, образующихся вокруг урановых рудных тел и их литогеохимических ореолов. Он заключается в опробовании подземных и поверхностных вод на

содержание урана, его продуктов распада и элементов-спутников. Среди продуктов распада урана-238 для гидрохимических поисков наибольший интерес представляют радон, радий, в некоторых случаях уран-234.

Как во всех ореольных методах, основной задачей радиогидрохимических поисков является определение аномальных концентраций элементов существенно (обычно в 5 раз) превышающих их фоновые концентрации. В связи с этим одна из важнейших задач поисков заключается в определении местного гидрохимического фона для каждого исследуемого элемента. Гидрохимический фон находится в сильной зависимости от геологической, гидрогеологической и физико-химической обстановок, а также от климатических условий изучаемого района.

Уран является хорошим мигрантом лишь в окислительных условиях, где он находится в шестивалентном состоянии. В связи с этим окислительная обстановка благоприятна для перехода урана в воды, что влечет за собой изменение фоновых концентраций.

Форма, размеры и контрастность радиогидрохимических ореолов зависит от ряда геологических, гидрогеологических и геоморфологических факторов. Ореол, бывает вытянут в направлении движения вод; протяженные ореолы образуются в водах активного водообмена. Огромное значение имеет глубина циркуляции подземных вод.

Сильно влияет скорость водообмена на размера ореолов, поэтому глубинность радиогидрохимического метода, которая для горных районов может достигать несколько сотен метров, а для равнинных - лишь несколько десятков метров.

Радиогидрогеологические поиски подразделяются на рекогносцировочные, площадные и детальные. Рекогносцировочные поиски проводят на основе геологической съемки 1:200000 и 1:50000. Опробование водопунктов выполняют отдельными маршрутами.

Площадные поиски проводят на геологической основе 1:100000 и 1:50000. Они заключаются в опробовании всех имеющихся на территории естественных и искусственных водопунктов.

Детальные поиски проводят в масштабе 1:25000-1:5000 с привлечением специального бурения и шурфования. Они сопровождаются режимными и сезонными наблюдениями в скважинах и применяются для детализации ранее выявленных аномалий.

На участке аномалий проводится тщательный анализ геологической и гидрогеологической обстановок. Последний включает в себя определение областей питания, транзита и разгрузки подземных вод, выделение отдельных водоносных комплексов, определение интенсивности водообмена, общего химического и газового состава вод и т.д. В результате устанавливаются контуры радиогидрохимических аномалий в плане и на глубину, а также определяют источники обогащения вод радиоактивными элементами.

Для решения вопроса о природе выявленной аномалии необходимо совместно использовать радиохимические, гидрогеологические и геологические данные.

Чисто радиогидрохимическими поисковыми критериями урановых месторождений можно считать следующие.

1. Для вод, характеризующихся окислительными условиями (вод зоны активного водообмена), заслуживает внимания аномальные концентрации урана, которые сопровождаются аномалиями радона.

2. В водах, находящихся в восстановительных условиях, рудная аномалия будет носить радий-радоновый характер.

3. Для вод, омывающих массивные урановые руды, характерно пониженное изотопное отношение урана (уран-234/уран-238) по сравнению с окружающим фоном. Этот признак можно использовать только в сочетании с одним из предыдущих.

4. Нередко хорошим поисковым критерием является совпадение радиогидрохимических аномалий с аномалиями элементов спутниками урана (молибдена, свинца, мышьяка, фосфора, ванадия).

3.3 Прикладные аспекты эманационных исследований

Эманационный метод нашел некоторое ограниченное применение для разведки геотермальных градиентов; в

гидрологических исследованиях при изучении взаимодействия между грунтовыми водами и потоками. Любые значительные концентрации радона являются хорошим показателем для локализации притока грунтовых вод.

Исследованию связи между концентрацией радона в подпочвенном воздухе и изменениями напряженно-деформированного состояния с целью прогноза землетрясений усиленно ведутся в течение последних 40 лет [2, 4, 32, 33, 43, 46-49, 67, 118, 148]. Несмотря на неоспоримый факт выявления предвестниковых аномалий в поле подпочвенного радона перед некоторыми сильными землетрясениями, радоновый метод нельзя отнести к методам с большой эффективностью, т.к. довольно высок пропуск «целей». Проведенные в 1970-1980 гг. научные исследования по измерению эмиссии радона вблизи разломов выявили, что землетрясения часто происходили при отсутствии радоновой эмиссии, и радон часто обнаруживался вне землетрясения. Это привело к утверждению о ненадежности радонового индикатора землетрясений. Однако, с 2009 проводятся радоновые исследования НАСА в качестве возможного предсказателя землетрясений.

В работах [48, 49], на основании численных расчетов с использованием диффузионно-конвективного уравнения массопереноса радона показано, что величина ППР более чувствительна к изменению напряженно-деформированного состояния геосреды, чем величина объемной активности радона (ОА ^{222}Rn) в подпочвенном воздухе [10, 18]. Это подтверждено экспериментальными данными, полученными на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне. В данной работе предлагается алгоритм расчета ППР при условии регистрации ОА ^{222}Rn на разных глубинах относительно поверхности.

Методика расчета плотности потока радона на земной поверхности по эмпирической зависимости:

$$q(z)|_{z=0} = D_B k_{11} \frac{N_1}{2 - \frac{N_2}{N_1}} \frac{1}{h_1} \ln \left(\frac{1}{\frac{N_2}{N_1} - 1} \right) \quad (3.8),$$

где N_1 и N_2 объемная активность радона-222 на глубинах h_1 и h_2 , соответственно; k_n – пористость грунта, D_B – коэффициент диффузии.

Модель Рудакова [322] состоит из представлений, что тектонические нарушения (разломы, трещины разного порядка) в зонах растяжения рассматриваются как открытые флюидонасыщенные коллекторы, являющиеся местом разгрузки и транзита подземных вод, через которые осуществляется газообмен с атмосферой Земли, контролируемой изменениями напряженно-деформированного состояния пород определенных регионов.

В зоне динамического влияния разломов выделяют две подзоны: 1 – зона аэрации; 2 – зона насыщения, отвечающая суммарной мощности гидравлически связанных по разломам водоносных горизонтов.

В зоне аэрации, принудительный перенос радона происходит как следствие перепадов давления, вызываемых колебаниями атмосферного давления и уровня подземных вод. В зоне насыщения, расположенного ниже уровня грунтовых вод, условия миграции радона контролируются в условиях гидростатического давления при весьма низких значениях диффузии. Поэтому основными механизмами миграции радона к дневной поверхности является его перенос в растворенной форме с подземными водами и диффузия с растворенными в воде газами при нарушении фазового равновесия в системе «газ-вода-порода» [32].

Реакцией зоны насыщения на изменения напряженно-деформированного состояния земной коры является изменение уровня поверхности открытого (безнапорного) водоносного горизонта, который в свою очередь, влияет на динамику массопереноса в зоне аэрации.

4. КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ЭМАНАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1 Программа радоновых исследований

Национальные радоновые обследования должны проводиться с целью установления распределения концентраций радона, оценки его воздействия для населения страны с использованием признанных средств измерений радона.

Главным результатом национальных радоновых программ является снижение в целом риска для населения и индивидуального риска для людей, живущих с высокой концентрацией радона. Прикладными аспектами программы - установление или коррекция существующего национального опорного уровня [123, 124].

Национальные контрольные уровни. Опорный (или контрольный) уровень представляет собой максимальную принятую среднегодовую концентрация радона в жилом доме, выше которого страна настоятельно рекомендует или требует защитных или корректирующих противорадоновых мероприятий. Когда измерения радона показывают превышение этого уровня, то настоятельно рекомендуется принять меры для снижения концентрации радона. В некоторых странах (Швеция, Швейцария, Чехия) это условие является даже обязательным. В случае превышения контрольных уровней, решение о применении рекомендательных или обязательных действий по снижению концентрации радона в домах или других зданиях лежит в компетенции отдельных стран. В любом случае, следует создать свои национальные уровни (табл. 12).

Табл. 12 – Национальные опорные уровня радона в ряде стран, Бк/м³ [167]

| № | Страна | B1 | B2 | B2a | B2б |
|---|-----------|----|----|---------------------------------------|----------------|
| 1 | Аргентина | + | + | 400 | 200 |
| 2 | Австрия | + | + | 400 | 200 |
| 3 | Бразилия | + | - | - | - |
| 4 | Бельгия | + | + | 400 | 200 |
| 5 | Болгария | + | + | 500 (рек. 250) для существующих домов | 200 (100 рек.) |
| 6 | Канада | + | + | 800 дома под реконструкцией; | 800 <200> |

| № | Страна | B1 | B2 | B2a | B2б |
|----|------------|----|-----|--------------------------------------|--|
| | | | | 200 - новые дома | |
| 7 | Китай | + | + | 400 для домов; 1000 для р.м. | 200 |
| 8 | Чехия | + | + | 400 | 200 |
| 9 | Дания | + | + | 200 (с градацией <400) | 200, об. с вытяжной вентиляцией |
| 10 | Эквадор | - | - | 200 (мин.) - об.; 400 (макс.) | об. |
| 11 | Финляндия | + | + | 400 | 200 об. |
| 12 | Франция | + | (-) | 400 комп. для отдельных зданий | |
| 13 | Грузия | + | + | 200 комп. | 100 |
| 14 | Германия | + | + | 100 | 100 |
| 15 | Греция | + | + | 400 | 200 |
| 16 | Ирландия | + | + | 200 | 200 |
| 17 | Италия | + | - | - | - |
| 18 | Япония | + | - | - | - |
| 19 | Корея | | - | - | - |
| 20 | Киргизия | + | + | <200 | 200 |
| 21 | Латвия | + | + | 200; 600 об. | 200 об. |
| 22 | Литва | + | + | 400 | 200 |
| 23 | Марокко | + | + | | Нет разницы существующие или реконструируемые здания |
| 24 | Нидерланды | + | + | | 30 средние для всех новых жилищ построенных в один год; если уровень превышает - новые регулирующие нормы |
| 25 | Норвегия | + | + | 200 | 200 об. верхний уровень строительных норм |
| 26 | Парагвай | - | - | - | - |
| 27 | Перу | - | + | 200-600 - дома; 1000 - р.м. | - |
| 28 | Румыния | + | + | 400 | 200 |
| 29 | Россия | + | + | 400 для сущ. домов об., | 200 |

| № | Страна | B1 | B2 | B2a | B2б |
|----|----------------|----|----|---|---------------------------------|
| | | | | комп.; 200 - (100 нов. рек.) | |
| 30 | Словения | + | + | 400 - дома; 400 об. детск. сады и школы; 1000 об. - комп. | Такие же для существующих домов |
| 31 | Испания | + | - | - | - |
| 32 | Швеция | + | + | 200 об. | 200 об. |
| 33 | Швейцария | + | + | 1000 об. | 400 об. |
| 34 | Великобритания | + | + | 200 | 200 об. |
| 35 | США | + | + | 148 | 148 |

B1 – наличие национальной радоновой программы, B2 – наличие уровня действия, B2a – для существующих жилищ, B2б – для строящихся и реконструируемых жилищ; мин - минимальное, макс. - максимальное; об - обязательное, жил. - жилища; р.м. - рабочие места, комп. - компании

На национальном уровне определяется уровень риска от радона внутри помещений, тем не менее, меры защиты могут применяться ниже этого уровня, чтобы гарантировать, что концентрации радона в домах значительно ниже этого уровня. Настоятельно рекомендуется принять меры для снижения уровня радона жилищ, где он превысил опорный уровень. Обследование ВОЗ 36 стран показало, что почти все страны установили контрольные уровни для существующих зданий от 200 Бк/м³ и 400 Бк/м³. В некоторых странах установлено 2 контрольных уровня. Один для существующего жилья и отдельный уровень с более низкими значениями для новых или будущих домов.

Рекомендуется установить национальный опорный уровень на разумно-достижимом низком уровне. Ввиду последних научных данных о последствиях для здоровья радона отсчета уровень 100 Бк/м³ оправдан с точки зрения общественного здравоохранения, потому что ожидается эффективное снижение связанных опасностей для здоровья для населения.

Однако, если этот уровень не может быть реализован в рамках господствующей в стране социально-экономических условий, выбранный опорный уровень не должен превышать 300 Бк/м³, который представляет около 10 мЗв в год в соответствии с последними расчетами МКРЗ.

Большинство стран использовали европейскую рекомендацию на среднегодовую концентрацию радона в помещении, которое не

должно превышать 400 Бк/м³ в существующих зданиях и 200 Бк/м³ для новых конструкций.

Кроме того, должны быть приняты во внимание различные национальные факторы, такие как распределение радона, количество существующих домов с высокой концентрацией радона, среднее арифметическое значение концентрации радона в воздухе помещений, распространенность курения и т.д.

Поскольку распределение радона во многих странах имеет вид близкий к логнормальному, то в большинстве домов уровни радона будут ниже некоторого опорного уровня (обычно 200 Бк/м³). Поэтому предполагается, что большая часть радоновых рисков связанных с возникновением рака легких будет формироваться в жилых домах с уровнями ниже контрольного уровня, а не исключительно жилищах с аномальными содержаниями радона. Эти соображения имеют важное значение для разработки национальной стратегии контроля радона.

Концентрирование усилий следует прикладывать туда, где ожидаются более высокие концентрации радона в воздухе домов в районах с низким уровнем радона в почве и имеющие высокую плотность населения (например, города и городские агломерации), нежели в регионах с высокой концентрацией радона и низкой плотностью населения.

Для большинства новых и реконструированных жилищ, низкие концентрации радона внутри помещений могут быть достигнуты более легко и с меньшими затратами, чем в существующих жилых домов. Таким образом, концентрации радона в таких зданиях должны быть четко зафиксированы ниже национального опорного уровня.

Национальные контрольные уровни являются лишь одним из средств, чтобы уменьшить вред для здоровья из-за радона, так как только небольшая часть населения, как правило, подвергается воздействию высокой радоновой концентрации. Снижение средней концентрации радона для населения, в целом, путем осуществления соответствующих положений и строительных норм, является одним из главных подходов в национальной программе исследования радона.

Пример **Региональная программа изучения радоноопасности в Республике Казахстан (Восточно-Казахстанская область).** Несмотря на наличие в городе Усть-Каменогорске потенциально опасного в радиационном отношении предприятия атомно-промышленного комплекса, радиационное обследование города было начато лишь в 90-х годах прошлого столетия, в

рамках общесоюзной программы «Изучение радиационной экологии городов Казахской ССР», разработанной по распоряжению Совмина Каз.ССР от 21 мая 1989 г. По результатам исследований проведенных за все эти годы было выявлено 411 аномалий, из которых 206 были связаны с радиоактивно загрязненным грунтом, 64 - представляли радиоактивные аномалии в строительных материалах, железобетонных изделиях и конструкциях, 141 - являлись техногенными источниками ионизирующего излучения. В настоящее время с учетом дезактивации аномалий, проведением строительных и земляных работ, которые привели к перемещениям некоторых аномалий, на территории города находятся 218 радиоактивных аномалий. Из них 32 радиоактивных аномалии расположены в жилых районах города. По предварительной оценке, объемы радиоактивных пород категории РАО в почвах и грунтах на территории жилой зоны г. Усть-Каменогорска, только в слое до 1 м составляют более 62000 м³.

В 2004 году в рамках бюджетной программы Управлением природных ресурсов и регулирования природопользования Восточно-Казахстанской области было проведено комплексное геоэкологическое исследование территории и здоровья населения г. Усть-Каменогорска. На основании данных исследований были сформированы основные мероприятия, необходимые для оздоровления областного центра, наиболее приоритетные из которых вошли в региональную программу «Охрана окружающей среды Восточно-Казахстанской области на 2005-2007 год».

В 2005 году в рамках мероприятия «Разработка научно-обоснованного экологического паспорта г. Усть-Каменогорска», была проведена ревизия радиоактивных аномалий и загрязнений, выявленных в предыдущие периоды на территории селитебной зоны г. Усть-Каменогорска. Был составлен полный кадастр источников ионизирующего излучения и пятен радиоактивного загрязнения, выявленных на территории города с 1990 по 2005 годы, который в дальнейшем был передан государственным органам, осуществляющим контроль в области радиационной безопасности.

В последующие годы Управлением планомерно проводились работы по дезактивации и рекультивации наиболее крупных и опасных паспортизированных очагов радиоактивного загрязнения по ул. Отдельная (2006 г.), по ул. Попова (2007 г.), ул. Серикбаева, р-н политехнического колледжа (2008 г.).

Так как г. Усть-Каменогорск является единственным городом в Казахстане, в селитебной части которого имеется большое количество радиоактивных аномалий связанных с загрязнением грунтов (рис. 37).

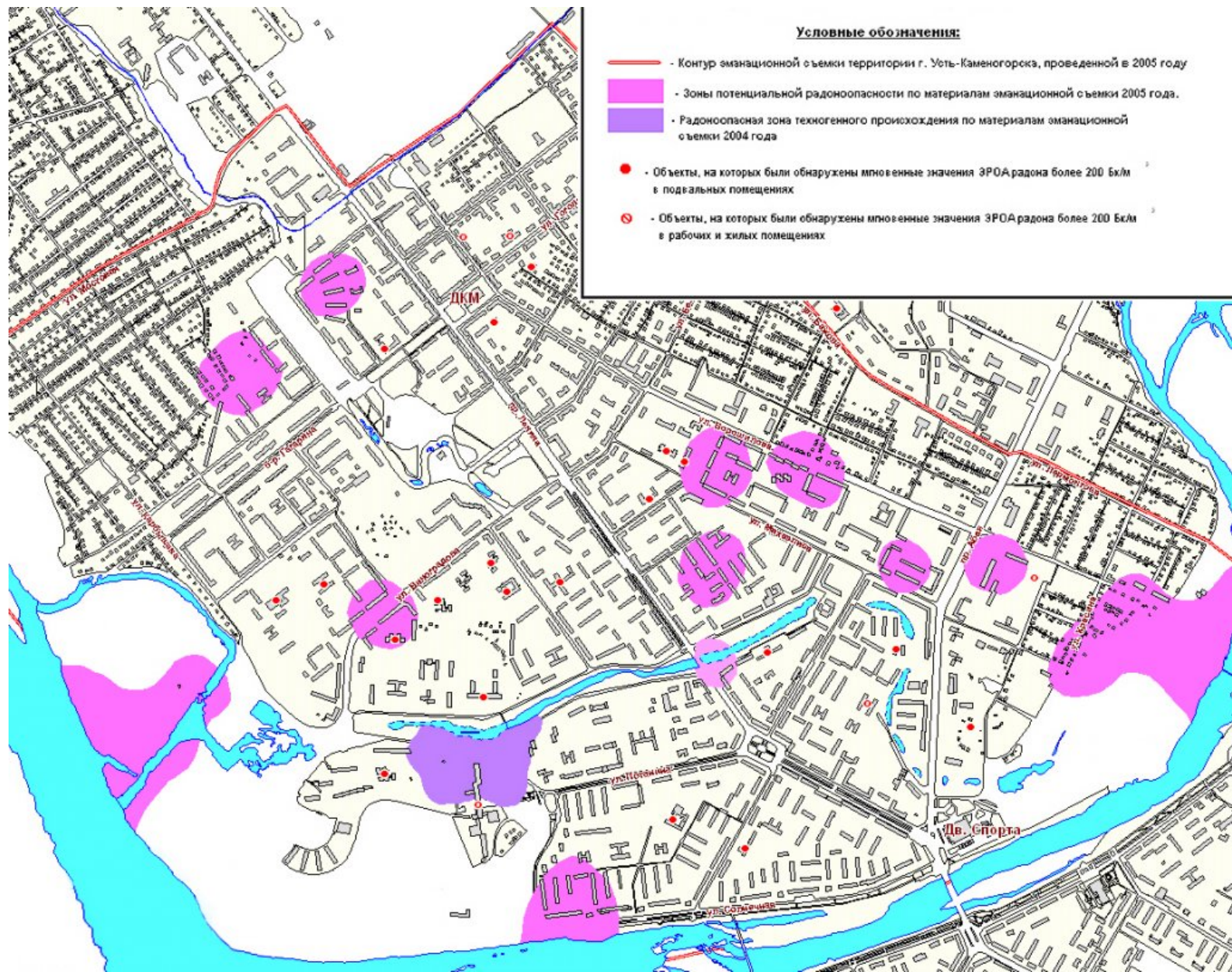


Рис. 37 - Радиоактивные аномалии Ульбинской части города Усть-Каменогорска (по данным работ 2004-2005 гг.)

И это загрязнение является историческим, проблема ликвидации радиоактивных аномалий города вошла в Реестр экологических проблем Республики Казахстан утвержденный приказом Министра охраны окружающей среды Республики Казахстан от 04 февраля 2008 г. № 15. (Реестр экологических проблем Республики Казахстан разработан в части реализации Концепции экологической безопасности Республики Казахстан на 2004 - 2015 годы и программы «Охраны окружающей среды РК на 2008 - 2010 годы»).

Общий анализ радиационной обстановки жилой зоны г. Усть-Каменогорска показывает, что в наибольшей степени радиоактивному загрязнению были подвержены территории районов, на которых до 50 - 60-х годов прошлого столетия функционировали доводочные фабрики бывшего треста Калбаолово, которые находились в районе бывшего вокзала Риддерской железной дороги (ул. Булова) и территории Восточно-Казахстанского технического университета им. Д.Серикбаева (левый берег р. Комендантки) и обогащали уран-торий содержащий монацитовый концентрат. В период деятельности доводочных фабрик в г. Усть-Каменогорске, хвостохранилищ и спецмогильников для хранения хвостов переработки концентратов не имелось. Хвосты доводки размещались на территориях фабрик и в дальнейшем рассредоточивались на пустырях вокруг самих объектов, в котлованах, а также использовались для засыпки рытвин, ремонта грунтовых дорог. Дальнейшая интенсивная застройка, рост плотности населения с одновременным расширением границ городской территории обусловило необходимость исключения возможного риска облучения людей и радиоактивного загрязнения.

Следует отметить, что на основе проведенных детальных работ в 2008 году были уточнены границы радиоактивного загрязнения (в подземном горизонте) на территории жилой зоны г. Усть-Каменогорска в районе улиц Новаторов и Питерских Коммунаров. В ходе исследований установлено, что основными источниками радиоактивного загрязнения территории Усть-Каменогорска, наряду с отходами доводочных фабрик бывшего треста «Калбаолово», которые располагались в 50-60 годах прошлого столетия, на территории современной селитебной зоны, также являются промышленные отходы уранового и танталового производств АО «УМЗ».

По результатам проведенных работ было принято решение в 2009 году провести работы по дезактивации и рекультивации радиоактивных аномалий на пересечении улиц Новаторов и Питерских Коммунаров между домами № 6 и № 8.

Однако существуют не только техногенные радиоактивные аномалии, но и аномалии природного характера. Напряженность радиационной ситуации Восточно-Казахстанского региона определяется пятью потенциально радиационно-экологически опасными зонами – Улькен-Акжал-Жарминская, Зайсанская, Карабулакская, Калба-Нарымская,

включающая территорию города Усть-Каменогорск, и Лениногорская. Возможную угрозу представляют уран-торийсодержащие месторождения и рудопроявления, а также глубинные тектонические разломы, по которым отмечается интенсивные эманации радиоактивных газов. Опасные в экологическом плане объекты могут находиться где угодно – в недрах, на поверхности, в водоносных песчано-глинистых отложениях.

В Усть-Каменогорске радиационную опасность представляют отходы обогащения уран-торийсодержащих монацитовых россыпей на территории технического университета им. Д. Серикбаева и на пересечении улиц Новаторов и Питерских коммунаров. Кроме того, в 2004 и 2005 годах в Усть-Каменогорске отряд ТОО "Экосервис С" обследовал 120 жилых и производственных помещений, в том числе дошкольные и школьные учреждения, больницы, поликлиники. Из них в 18 зданиях превышение активности радона – более 200 Бк/м³. Максимальная активность – 2687 Бк/м³ отмечалась в детском саду №46. В пригороде были проверены 52 частных дома. В подвалах обнаружено 19 аномальных значений по Rn-222. Максимум зафиксирован в одном из жилых зданий п. Мирный – 1709 Бк/м³.

На Бухтарминском участке превышение уровня радона выявлено в пяти изученных населенных пунктах, по обе стороны центральной части Бухтарминского водохранилища. В 20% обследуемых зданий активность радона была выше 200 Бк/м³. Максимальные значения отмечены в кабинетах начальных классов в школе п. Караколь - 1550 Бк/м³ и в подвале жилого дома – 8959 Бк/м³. В питьевых водах почти каждого поселка активность радона выше уровня вмешательства в 2-5 раз.

На окраинах поселков Палатцы, Подгорное и Караколь с советских времен остались нерекультивированные отвалы пород. В штольнях, карьерах этих бывших рудников активность радона составляла более 10215 Бк/м³. Среди взрослого населения участка отмечен высокий уровень заболевания почек, а также рака печени и легких.

На Курчумском участке по сведениям ТОО "Экосервис С", в поселках Енбек и Жылытау повышение активности радона в подвалах жилых домов достигает 689 Бк/м³. В питьевых водах – в 2-3 раза выше допустимого уровня. Помимо этого, в пределах участка Курчумский бьют многочисленные родники с большим содержанием радона и урана. Например, в скважине на берегу озера Арасан активность радона составляет 2375 Бк/л.

На Лениногорском участке в зоне между хребтами Черный и Ивановский, вдоль реки Уба установлена наиболее радиационно-опасная территория. Это связано с высоким значением активности целого ряда радионуклидов.

Важно отметить, что по существующим нормативам Республики Казахстан [26] во вновь строящихся домах активность радона не должна

быть более 100 Бк/м³, для существующих жилищ – не более 200 Бк/м³, а если не удастся снизить концентрацию до 400 Бк/м³, то решают вопрос о переселении жильцов. Судя же по вышеприведенным значениям во многих домах по радону превышен критический уровень.

Поэтому, для данных регионов весьма актуально наладить систему мониторинга радоноопасности территории населенных пунктов. Для данных исследований намечено широкое привлечение геоинформационных технологий. Целевые индикаторы обусловлены необходимостью обеспечения безопасности населения в пределах территорий с повышенным радиогеохимическим фоном как естественного, так и техногенного происхождения. В ходе проведения работ будут выделены радоновые и тороновые аномалии, определено их происхождение, а также степень опасности, что будет отражено в соответствующей геоинформационной системе. В пределах наиболее крупных и интенсивных аномалий, на период выполнения проекта, будет налажена сезонная система мониторинга радоноопасности изучаемых территорий.

Задачи радонового мониторинга. Основное число радоновых программ концентрировало усилия на мониторинге радона в жилых помещениях или в почвенном воздухе. Не зная точного состояния этой системы, т.е. концентраций всех ее составляющих, нельзя точно определить степень радоновой опасности. В развитых странах Северной Америки и Европы, измерение радона внутри помещений газа радона является наиболее распространенным подходом и с успехом реализуется в последние годы. Кроме того, это и наиболее технически сложная задача, ведь концентрации радона в воде или в почве обычно в 100 - 1000 раз больше уровней, чем в помещениях.

При проектировании национального радонового обследования закладывается решение двух ключевых задач:

1) установление распределение радоновых рисков, что можно сделать с помощью *взвешенного оценивания* - измерения уровней радона в случайно выбранных домах. Это может быть достигнуто путем выбора дома наугад из полного списка домов. Результаты исследований нужно взвешивать согласно плотности населения, иначе в районах с низкой плотностью населения будут формироваться неопределенные результаты или совсем отсутствовать.

2) установление концентраций радона *по географически распределенной системе обследования*. Для получения данных по пространственно однородной радоновой съемке, выбор домов должен быть основан на географической (или административной) основе. Распределение точек обследования выбирается таким образом, чтобы получить минимальное количество результатов на площади. Область может быть регулярной (например, сетки квадрата) или нерегулярной (площадь в пределах административно-территориальной единицы). Иногда для ограничения областей применяют геологические границы. Фактическое количество и размер ячеек сетки будет определяться имеющимся финансовыми средствами, пространственное и численно отвечающее требуемой точности и статистическим оценкам.

Например, массовое определение ЭРОА в г.Киеве носили выборочный характер. Выборки формировались на основе двух базовых подходов: 1) случайный выбор объекта измерений; 2) привлечение данных о концентрациях (уровнях ОА) радона и торона в почвенном воздухе. Основными требованиями для правильного формирования выборок были: равномерное расположение объектов обследования на территории города и представительный учет основных типов жилья [27].

Картирование радоновых уровней может быть получено путем простого усреднения результатов в пределах некоторой области или с применением современных геоинформационных методов.

В большинстве стран для радонового мониторинга приняты административные границы. В их пределах определяют локальные средние значения радоновых уровней. В некоторых странах использовали географическую сетку как систему отсчета для определения радоновых уровней. С другой стороны, лишь в немногих национальных радоновых программах используются передовые геостатистические методы интерполяции радоновой съемки.

По возможности целесообразно проведение совместных измерений радоновых уровней в почвенном воздухе и воздухе помещений. Исследования радоновых уровней в почвенном воздухе используется для ограничения радон-уязвимых районов

на основе статистических и географических критериев. Тогда как измерения внутри жилищ обычно дополняют результаты в части оценки экспозиции популяции в радон-уязвимых регионах. Предпочтительно измерения радона для обоих видов обследований должны проводиться в течение одного года в каждом доме, чтобы минимизировать неопределенности в связи с сезонными изменениями концентрации радона.

Существует вероятностно-математические подходы обработке измерений сезонной или долгосрочной ОА радона и торона к среднегодовым значениям: температурная нормализация и сезонная нормализация [27].

Сезонная нормализация. Увеличение разности температуры и давления в помещении и в наружном воздухе зимой по сравнению с летом обуславливает увеличение скорости воздухообмена. Характер сезонных вариаций радона определяется соотношением между диффузионным и конвективным поступлением радона.

Сезонные вариации ОА радона описываются сезонным отношением $k_{w/s}$, а также летним и зимним сезонными коэффициентами, которые определяются:

$$k_{w/s} = \frac{C_w}{C_s} \quad (4.1)$$

$$k_s = \frac{\bar{C}}{C_s} \quad (4.2)$$

$$k_w = \frac{\bar{C}}{C_w}, \quad (4.3)$$

где индексы s - показатели летнего сезона, w - зимнего сезона, \bar{C} - среднегодовое значение ОА радона, Бк/м³.

Суточная вариация ОА радона. Наиболее высокие концентрации радона (до 80 Бк/м³) были обнаружены при погодных условиях, когда наблюдалось высокое атмосферное давление и тепловой градиент имел положительное значение как ночью, так и утром. То есть, преобладали стабильные атмосферные условия.

Низкие концентрации радона наблюдались при дневном отрицательном тепловом градиенте и нестабильной атмосфере. С восходом солнца в приземном слое атмосферы начинается перемешивание воздуха. Погодные условия отмечаются

облачностью и высокими скоростями ветра. При этом отмечается наименьший позитивный тепловой градиент ночью и минимальные уровни ОА радона на протяжении всего дня (с вариацией в 2-8 Бк/м³) [131].

Уровни радона в воздухе помещений, как правило, наибольшие в зимний период. Если уровни не увеличиваются в этот период, дополнительные измерения могут и не проводиться. В случае обнаружения высоких уровней активности, дополнительные измерения должны проводиться в других частях дома, в том числе в подвале, и в другие времена года. Областям с высокой дозовой нагрузкой должна быть приурочена значительная часть измерений и защитных мероприятий.

Типовая схема проведения национальной радоновой программы.

1. Выбор домов для измерений радона должен проводиться случайным образом с использованием избирательных, почтовых, таможенных или других списков;

2. Контактное с населением (обычно по почте (рис. 38)) с предложением участвовать в опросе;

3. Информационная часть программы с использованием местных СМИ.

4. Распределение и рассылка детекторов по почте вместе с инструкцией и/или буклетом и опросным листом.

5. Информирование домовладельцев о результатах с соблюдением конфиденциальности.



Рис. 38 – Почтовая рассылка детекторов вместе с инструкцией и опросчиком (Landauer Nordic, Швеция)

Измерения радоновых уровней в жилищах. Измерения радона в частных домах должны быть направлены на получение

надежной оценки облучения индивидуума при сохранении умеренных затрат. Высокая временная изменчивость радона внутри помещений во многих регионах делает краткосрочные измерения ненадежными для этих целей, кроме случаев, когда наблюдаются очень высокие уровни концентрации радона [53, 76, 77, 84, 96, 113, 141, 143, 146]. В некоторых странах, измерения, сделанные в разное время года корректируются под среднегодовую концентрацию радона на основе "типичных" сезонных вариаций [127, 132, 165, 166]. Помимо этого, одно измерение в одной комнате, где ожидается высокая концентрация радона, распространяется на оценку концентрации радона "всего дома". Это измерение часто должно быть проведено в жилой комнате, либо в комнате с наибольшей площадью соприкосновения с землей или местом, где наименьшая вентиляция (в случае поступления радона из строительных материалов). Неопределенность такого рода при таких измерениях должна быть обязательно введена в протоколы измерений. Трактование термина "частично занятое жилое пространство" отличается в разных странах. Поэтому в протоколы вводится процентное отношение времени, проведенного внутри дома. Протоколы измерения должны свести к минимуму возможность технического сбоя детекторов, результаты которого могут быть искажены переносом, влажностью, температурой, сильным светом, гамма-излучением или присутствием торона.

В некоторых странах радоновые измерения являются частью стандартной оценки безопасности дома, которая осуществляется перед их продажей. В Норвегии, Швейцарии, Великобритании и США измерения радона уже обязательны как часть процедур при покупке или продаже дома [132].

Хотя эти диагностические тесты часто недостоверны в радон-уязвимых районах, подверженных сильным сезонным колебаниям радона. В различных странах существуют свои национальные требования к проведению того или иного типа радоновых измерений в домах.

В Финляндии и Швеции рекомендуют проводить измерения в течении отопительного сезона (октябрь-апрель), т.к. в течении этого периода ожидаются наибольшие концентрации радона

внутри помещений. В Ирландии и Великобритании измерения радона проводят в течении любого 3-х месячного периода в году и вводят корректирующий сезонный фактор. В Италии применяют одногодичные измерения, чтобы избежать неопределенности, связанной с сезонным фактором. В США большинство измерений выполняют при сделках с недвижимостью, что и объясняет широкую практику краткосрочных измерений.

Измерения радоновых уровней в крупных зданиях. Измерение концентрации радона в больших зданиях, таких как школы, предприятия и т.д. могут отличаться от воздействия облучения в отдельных домах из-за различий в конструкции здания, размещения и отопления, вентиляции [73, 80-82, 88, 116]. Протоколы измерений должны отражать эти различия, определяя несколько мест отбора проб в местах с наибольшей концентрацией персонала, с большими площадями пола, многоэтажностью и наличием помещений с различным режимом вентиляции. Как правило, измерения на нижних этажах должны проводиться по более плотной сетке вследствие большого радонового потенциала на первых контактных с фундаментом этажах, когда радон из почвы газа является основным источником.

Проведенные измерения радона во многих зданиях показали значительные суточные вариации. Этот эффект может быть усилен в зданиях с принудительной механической вентиляцией и жестким режимом ее использования на протяжении суток. Здания, которые имеют высокие средние концентрации радона, но заняты только в течении части дня, возможно, должны быть измерены в течение периодов занятости, чтобы определить, существует значительный суточный ход радона [78].

Для кирпичных и панельных жилых домов не устанавливается статистически значимой зависимости ЭРОА радона в воздухе помещения от уровня этажа, начиная со второго и выше, т.е. концентрация радона на разных этажах варьирует около среднего значения в диапазоне разброса $\pm 25\%$ [27].

Диагностические измерения для корректирования последствий облучения радоном. Среднемировое значение ЭРОА

радона в жилых помещениях равно 40 Бк/м³. Установлено, что во многих странах, по меньшей мере, в одном-двух, из ста помещений наблюдается превышение уровня ЭРОА в 250 Бк/м³, что соответствует дозе 6,3 мЗв/год [17]. Решение для проведения корректирующих мероприятий в жилищах должно быть основано на оценке долгосрочной средней концентрации радона в наиболее занятой части дома. Если краткосрочные измерения радона показывают очень высокую концентрацию, решения для корректирующих мероприятий могут быть сделаны без подтверждения долгосрочного теста. Краткосрочные и долгосрочные измерения должны запускаться одновременно после первоначального измерения. В сжатые сроки должна внедряться система корректирующих мероприятий. Долгосрочные измерения следует повторять каждые несколько лет для обеспечения устойчивой эффективности системы радоновой коррекции.

Определения уровней ЭРОА радона и торона проводят в воздухе "помещений с использованием аспирационных методик [11]. Среднегодовые уровни ЭРОА радона определены мониторинговыми исследованиями в каждом обследуемом помещении. Эти методы использовались для решения задач по оценке радиационной обстановки, уточнения значений коэффициента равновесия F для радона и т.д. Результаты приводились к единому виду - среднегодовым значения ЭРОА радона и торона. При этом использовались исследования региональных характеристик коэффициента равновесия радона и сезонных вариаций радона и торона.

Для каждого обследуемого помещения регистрировали строительно-конструкционные и другие характеристики, которые могут влиять на накопление радона и торона. Регистрировали следующие параметры:

- 1) характеристику строения: дома городского или сельского типа (отдельно учитывали детские учреждения);
- 2) для домов городского типа фиксировали общую этажность дома и этаж, на котором расположена квартира, год постройки: дома делились на группы -до 1900 г. постройки, с 1900 г. до 1941 г., с 1946 г. до 1969 г., с 1970 г. до 1989 г. и после 1990 г.;
- 3) наличие подвала, материал покрытия пола;

4) строительные и отделочные материалы, которые могут служить как источником эксгаляции радона и торона в помещения, так и препятствием для поступления радона;

5) рассматривались материал стен, их внутренняя отделка, покрытие, материал пола и его покрытие, в ряде случаев материал засыпки или утеплителя потолка, пола; стен;

6) место измерений проводили преимущественно в подвалах и жилых комнатах первых этажей зданий;

7) тип (степень) вентиляции помещения (активная, пассивная или отсутствие).

Кроме строительно-конструкционных характеристик помещений регистрировали климатические условия (температура воздуха внутри помещений и снаружи, атмосферное давление), количество жильцов и длительность их проживания в данном доме.

Диагностические измерения для оценки поступления радона из строительных материалы. Поток радона (или эксгаляция) от строительных материалов может быть измерен в лаборатории или в полевых условиях (рис. 39) [117]. Если возможно легко получить образец строительного материала, то плотность потока радона определяется путем помещения его в закрытую камеру и извлечения из него воздуха, содержащего радон. В полевых условиях для оценки плотности потока радона используют различные методы: метод накопления, потоковый метод, метод адсорбции. Также для измерений эксгаляций радона используются γ -спектрометрия с высоким разрешением, которая определяет активность естественных радионуклидов в строительных материалах [119].

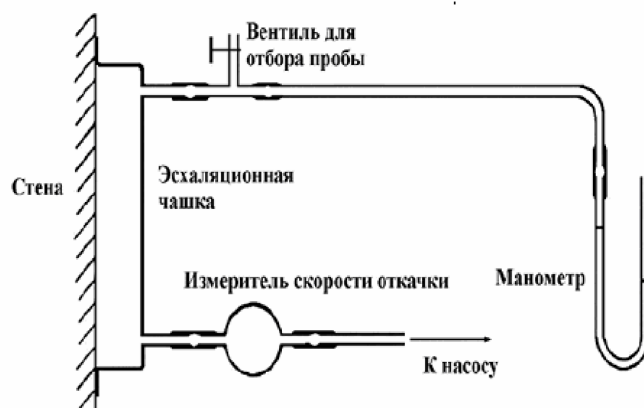


Рис. 39 – Схема аппаратуры для измерения потока радона, выделяющегося из стены жилого помещения, методом пониженного давления [5]

Повышенная концентрация торона внутри помещений в некоторых жилищах может формировать от 50 % или больше вклада в общую потенциальную α -энергии облучения. Торон проникает со стен строения и вследствие короткого периода полураспада формирует убывающий градиент концентрации от стен к центру помещения. Чтобы свести к минимуму ошибки измерения из-за присутствующего градиента концентрации торона, важно разместить детекторы не менее 20 см от стены. Для проведения комплексных измерений и радона и торона или оценить влияние торона, необходимо произвести отдельное измерение торона.

Обеспечение качества при измерении радона. Обеспечение качества представляет собой широкое понятие, которое включает все вопросы, которые в индивидуальном порядке или коллективно влияют на качество измерения. Обеспечения и контроль качества измерений должно быть строго соблюдаться для обеспечения надежности измерений радона [149-163]. К части политики качества контроля уровней ионизации воздуха производственных и общественных помещений и их метрологическое обеспечение, отвечающей за приборное оснащение, относятся следующие требования:

1. *Высокая чувствительность и минимальная определяемая концентрация.* Любому субъекту, проводящему измерение

радона, следует рассчитать и включать минимальную определяемую концентрацию радона.

2. *Экспрессность*. Значительные объемы измерений требуют использования высокопроизводительных средств контроля.

3. *Селективность*. Методы регистрации должны учитывать возможность выделения различных групп ионов.

4. *Автономность и портативность*. При работе приборного оснащения при реальных условиях необходимы ограничения на вес и энергопотребления аппаратуры.

5. *Многофункциональность*. Наличие микропроцессорной технологии позволяет накапливать, обрабатывать данные в ходе измерений для принятия оперативных решений о контрольных измерениях или детализации выявляемых аномальных уровнях аэроионного режима.

6. *Метрологическое обеспечение*. Приборы должны быть обеспечены утвержденными методиками и проверены. Также они периодически должны участвовать в межлабораторных тестах сравнениях.

Определение радонового фона. Оценка фона при непрерывных мониторингах, по крайней мере ее ежегодное проведение, будет выступать частью калибровочного процесса. Вместе с тем, необходимо учитывать, что долгоживущий продукт распада радона, свинец-210, накапливается в детекторе. Оставшиеся 2 радионуклида урановой серии, висмут-210 и полоний-210, также входят в определенную степень равновесия со свинцом-210. Это вызывает, как правило, добавочное альфа-излучение, что вызывает увеличение фона со временем.

Фон непрерывных мониторов часто использующих сцинтилляционный детектор может нуждаться в частых последующих измерениях. Поскольку он зависит от количества пользования и концентрации радона, под действием которого он экспонировался. Общее эмпирическое значение заносимые протокол говорит о необходимости измерения фона каждые 1000 часов работы. Если изменение фона меньше эквивалента в ~ 30 Бк/м³; то количество часов между измерениями фона может быть увеличено, при условии, если система не подвергается влиянию большой концентрации радона. Если более чем один непрерывный монитор используется, фон должен быть определен

для каждой комбинации сцинтилляционной клетки и ФЭУ.

Дублирование измерений радона. Измерения следует дублировать в размере, указанном в плане обеспечения качества, обычно 10%, путем совмещенных измерений двумя мониторами одинакового типа. Относительное расхождение двух измерений будет выступать основой для вычисления точности монитора. Такие измерения должны быть сведены в таблицу и нанесены на контрольные графики. Если дубликаты измерения не совпадают, это может быть показателем того, что один или оба из мониторов не правильно откалиброваны. В случае невозможности проведения 2 мониторами дублированных измерений, параллельно производят измерение другим типом детектора - активированным углем. Такой тип называется "неформальным способом сравнения".

Перекрестные проверки. С интервалом примерно 6 месяцев, либо посередине между сроком калибровки, используемый мониторы радона могут быть проверены третьим устройством, который только что прошел калибровочные процедуры. Откалиброванный монитор обеспечивает лучшую оценку концентрации радона, а относительная погрешность может быть рассчитана с предположением, что этот монитор обеспечивает условно "истинное значение". Также могут вводиться корректирующие поправки.

Протоколы измерений. При оформлении протоколов измерений необходимо учитывать заинтересованность в них многих сторон, включая самих исследователей, строителей, чиновников, отвечающих за реализацию региональной и национальное руководство здоровья и т.д. Также желательно в протоколе отмечать характеристики изменчивости измерения, прогностическую ценность результатов, различные виды неопределенности, которые возникают из пространственных, временных и инструментальных вариаций. Необходимая информация об измерениях радона, которая заносится в протокол, должна содержать данные о длительности измерений (долгосрочные или краткосрочные), погрешность измерения радона, фоновые значения, реферативные уровни.

Специальные измерения и протоколы могут потребоваться в высокорадоновых районах, где необходимо учитывать выбор эффективного детектора, климат, геологию и т.д.

Первичные результаты выполнения радоновой программы.

После того, как первоначальные оценки радоновой ситуации будут завершены и необходимость принятия дальнейших мер будет установлена, наступает этап разработки всеобъемлющей национальной политики касательно радона. Главной целью является защита населения от воздействия радона внутри помещений. Следует также уделить внимание оценке риска радона в школах, детских учреждениях и других общественных зданиях.

По результатам выполнения национальных радоновых программ, для дальнейшей идентификации регионов, чувствительных к высоким уровням радона (радон-уязвимые области), организовываются крупные исследовательские компании по измерению радона воздуха помещений и радона в почвенном воздухе. В большинство европейских стран (ЕС, Балканы и др.) такого типа исследования уже проводятся или проведены [130]. В Великобритании критерием определения радон-уязвимой области считается та область, где число жилищ с концентрациями радона выше 200 Бк/м^3 превышает 1%.

Среднеарифметическое значение концентрации радона в домохозяйствах Швеции составляет 108 Бк/м^3 . При жилом фонде в 4,1 млн жилищ, в 650 000 из них внутренние уровни радона превышают 140 Бк/м^3 и в 13 000 имеют уровни превышающие 400 Бк/м^3 . Обнаружено 1500 домов с радоновыми концентрациях выше 2000 Бк/м^3 .

В Ирландии внутренние концентрации радона лежат в диапазоне от нескольких десятков Бк/м^3 до нескольких тысяч Бк/м^3 . Средняя концентрация составляет 89 Бк/м^3 . Приблизительно 7% всех ирландских домов имеют концентрации радона выше контрольного уровня.

Средняя концентрация варьирует от 10 Бк/м^3 до более 100 Бк/м^3 во многих европейских странах, со средним около 100 Бк/м^3 в закрытом помещении. Значительная часть популяции находится в экспозиции между 300 и 740 Бк/м^3 . Типовое среднегеометрическое отклонение лежит в пределах от 2 до 3.

Отбор проб. Измерения обычно производятся на первом этаже домов. Для оценки доз, которые получают жители дома, измерения производят в спальнях и гостиных. Количество измерения можно увеличить вдвое за счет точек опробования различных комнат жилища.

Многие рекомендации основаны на оценке средних уровней радона в воздухе жилищ и они, как правило, имеют дифференцированный масштаб действий. При принятии решений учитывается количество времени, проводимое в доме и радоновый уровень мест в доме, где жильцы проводят большую часть этого времени. Если высокие уровни обнаружены в районах с высокой заполняемостью помещения, то меры по исправлению положения должны быть рассмотрены в виде консультативной помощи, получаемой от экспертов.

Выбор методов измерения. Для измерений используют различные типов детекторов, с различным интервалами времени экспозиции. Большинство стран при организации крупных кампаний мониторинга используют почтовую рассылку альфа-трековых детекторов. Их размещают в жилищах как минимум на три месяца. Зимнее время предпочтительнее, поскольку воздействие является самым высоким в связи с меньшей вентиляцией. Часто детекторы устанавливаются не персоналом исследовательских компаний, санитарных служб, а полицией. Как правило, минимальное время экспозиции - 3 месяца.

Анкеты предоставлены для сбора информации о месте размещения детектора, полный адрес, характеристики домов (система отопления, остекление окон, циркуляция воздуха, наличие подвала). Точки обследования наносятся на топографическую карту, и формируется слой данных в геоинформационной базе данных. Данные точкой сохраняются в базе данных содержащие другие атрибуты, такие как Rn концентрация, имя и адреса домовладельца, характеристика домов.

Другой тип измерений использует опробование с помощью принудительного отбора проб воздуха и его измерения на радоновое содержание. Но эти методы могут работать в течение нескольких дней только и требуют вмешательства специализированного персонала. В результате этого

многообразия в методах измерения и времени выборки (от нескольких часов до более года), прямое сравнение между расчетными уровнями, измеренными в разных странах следует проводить с осторожностью.

Отчетность исследований об уровнях радона. Количество радона высвобождается из горных пород земной коры в воздух и значительно отличается от места к месту. Уровень концентрации радона в одном и том же месте помещения может отличаться в два раза в течение 1 часа. Кроме того, концентрация в одной комнате здания может значительно отличаться от концентрации в соседней комнате. Для устранения вариативности показания усредняются согласно регулирующих нормативов. Концентрация радона в помещении обычно имеет логнормальное распределения на данной территории [114, 134, 145].

Вычисленное среднее геометрическое, как правило, используется для оценки "средней" концентрации радона в районе. Логнормальный вид имеет распределение домов с повышенным уровнем радона. Поэтому многие страны сообщают в своих сводных данных радоновых программ о среднем геометрическом и геометрически стандартного отклонении. Хотя для межрегионального сопоставления желательно вычислять и среднеарифметическое, с соответствующей мерой стандартного отклонения.

Большинство национальных докладов представляют результаты в виде карт радоновых рисков. Хотя получение карт радоновых рисков, очевидно, является мощным средством определения радон-уязвимых областей, но в тоже время, отображение уровней радона является сложной задачей (табл. 13). Нужно учитывать, что уровни радона между соседними домами могут варьировать на несколько порядков и зависят от строительного материала; изоляции; привычек жителей и т.д. Потому отображение границ радон-уязвимых областей включает подходы по усреднения результатов.

Табл. 13 – Состав радонового мониторинга в ряде стран Европы

| Страна | Населе- ние (x10⁶) | Количество мониторинго- вых жилищ | Количество точек измерений в почвенном воздухе |
|------------------------|--|--|---|
| Албания | 3,6 | 110 | Нет данных |
| Австрия | 8,2 | 16000 | 60 |
| Бельгия | 10,4 | 9000 | Нет данных |
| Хорватия | 4,5 | 782 | 38 |
| Кипр | 0,8 | 84 | Нет данных |
| Чешская Республика | 10,2 | 150000 | 9000 |
| Дания | 5,4 | 3120 | Нет данных |
| Эстония | 1,3 | 515 | 566 |
| Финляндия | 5,2 | 73074 | 400 |
| Франция | 60,7 | 12261 | 230 |
| Фарерские острова | 2,0 | Нет данных | Нет данных |
| Германия | 82,4 | >50000 | 4019 |
| Греция | 10,7 | 1277 | Нет данных |
| Венгрия | 10,0 | 15602 | Нет данных |
| Ирландия | 4,0 | 11319 | Нет данных |
| Италия | 58,1 | 5361 | Нет данных |
| Латвия | 2,3 | 300 | Нет данных |
| Литва | 3,6 | 400 | 70 |
| Люксембург | 0,5 | 2619 | Нет данных |
| Мальта | 0,4 | 90 | Нет данных |
| Голландия | 16,4 | 1846 | 475 |
| Норвегия | 4,6 | 51925 | Нет данных |
| Польша | 38,6 | 4098 | 210 |
| Португалия | 10,6 | 3317 | Нет данных |
| Румыния | 22,33 | 567 | Нет данных |
| Сербия- Черногория* | 10,8 | 968 | Нет данных |
| Словакия | 5,4 | 4019 | Нет данных |
| Словения | 2,0 | 2512 | Нет данных |
| Испания | 40,3 | 5600 | Нет данных |
| Швеция | 9,0 | 500000 | >2000 |
| Швейцария | 7,5 | 55000 | Нет данных |
| Англия | 60,4 | 450000 | Нет данных |

Расширенная схема национальной радоновой политики включает такие элементы:

- схема для уменьшения радоновой экспозиции на население и связанных с ними рисков для здоровья;
- методы измерения и протоколы, чтобы определить степень радон облучение населения;
- обеспечение проведения национальной съемки с использованием принятых радоновых средств измерения, методов и методик, протоколов для определения добавочной экспозиции от радона на популяцию;
- обеспечения разработки национальных уровней действий от обнаружения радона в домах;
- необходимости включения радоновых мероприятий местным и региональным органам власти;
- программы информирования общественности и домовладельцев о радоновой проблеме и повышения осведомленности о радоне;
- обеспечении тренинга профессионалов строителей или строительных норм на радоновую защиту новых жилищ и радоновой реабилитации в существующих домах; удостоверение точности результатов радоновых измерений. тренинг должен предварять внедрение радоновых мероприятий;
- программы которые фокусируют внимание на удостоверении низких радоновых уровней в существующих домах;
- программа которая фокусирует внимание на радон-защитные измерения в новых домах (реконструируемых домах).

Если вышеуказанные приложения внедрять должным образом, имплементация профилактических противорадоновых мер в новых домах, как правило, является наиболее рентабельным и эффективным способом достижения низких концентраций радона в индивидуальных хозяйствах и, следовательно, позволяет уменьшить среднюю национальную концентрацию радона. Со временем этот подход приведет к большему сокращению общего числа случаев рака легких, приписываемых воздействию радона, нежели альтернативные способы только сокращения радона в существующих зданиях, которые превышают контрольный уровень.

Радон-защитные меры могут также быть рекомендованы ниже контрольного уровня, чтобы обеспечить непревышение концентрации радона в домах. Эффективная программа делает также упор на предотвращение воздействия радона при новом строительстве, что подразумевает модернизацию строительных норм и правил касательно принятия мер по предупреждению радона в домах уже на стадии строительства.

Строительные нормы и правила касательно противорадоновых мероприятий. Реализация мероприятий по профилактике радона во всех домах на стадии строительства принимается в качестве экономически эффективного способа защиты населения. Если все сделано правильно, такие меры приведут к сокращению, с течением времени, в среднем по стране уровню радона и уменьшит число новых домов с концентрацией радона, превышающей контрольный уровень.

Национальные, региональные или местные органы власти должны рассмотреть вопрос о принятии строительных норм и правил и строительные нормы и правила, требующие мер защиты радона во всех новых строительствах. Более строгие требования могут быть необходимы в радон-уязвимых районах.

Обучение для профессионалов по снижению концентрации радона необходимо, чтобы помочь гарантировать то, что рекомендуемые меры по предотвращению радона и восстановлению правильно разработаны и установлены в новых и существующих домах. Соответствующие учебные программы должны быть также разработаны.

Общественность может не знать о мерах профилактики радона касательно нового жилья. Они могут не знать конкретных особенностей требуемой система профилактики радона. Именно поэтому компоненты системы профилактики радона должны быть надлежащим образом маркированы и понятны для неспециалиста.

Кроме того, связь с общественностью подразумевает необходимость проведения просветительской работы о преимуществах профилактики радона, так как это в конечном итоге, это поможет оказывать давление на строителей для того, чтобы все необходимые меры защиты радона установлены правильно.

Выявление и восстановление домов с высокой концентрацией радона. Уровень концентрации радона в домах зависит от многих факторов, таких как тип дома, дизайн и строительство, местные геологические условия, проницаемость почвы и т.д., и поэтому может меняться значительно даже между соседними домами. Концентрация радона в индивидуальном доме может быть определена только через измерение.

Например, эманационные исследования, проведенные в Швеции показали, что концентрация радона на глубине 1 м никогда не была меньше 5000 Бк/м³; а в воздухе некоторых домов встречалось более одной трети содержания радона в почвенном воздухе. Когда встречались уровни в 50 кБк/м³ в почвенном воздухе, всегда за этим стояли специфические геологические условия.

Тестирование радона из дома должно сопровождаться оценкой, которая включает рекомендуемые меры по сокращению радонового риска. Для домов с концентрацией радона выше контрольного уровня, восстановительные меры всегда рекомендуются.

Четкая информация об эффективных методах сокращения радона должна быть предоставлена домохозяйствам. Кроме того, жители дома должны быть проинформированы о последствиях для здоровья радона, а также совместного действия радона и курения. Информация о радоне и курение может быть использована в дальнейшем, чтобы поддерживать меры по борьбе против табака на здоровье.

Ответственность для снижения концентрации радона в доме обычно лежит на домовладельце. Тем не менее, в некоторых странах, таких как Швеция, Швейцария и Чешская Республика, существует требование, чтобы уменьшить уровни радона, если они выше 200 Бк/м³, 1000 Бк/м³ и 4000 Бк/м³, соответственно. В большинстве стран затраты на меры по исправлению положения должны быть оплачены домовладельцем или собственником жилья. В то время как эти затраты, как правило, небольшие сравнительно с другими расходами домашних хозяйств, они могут иногда сдерживать домовладельцев от принятия мер. Страны могут рассмотреть возмещение части или все затраты на домовладельцев или собственников, особенно если их

экономические средства ограничены или концентрации радона очень высоки. Как правило, последующие измерения для оценки эффективности принятых мер по исправлению положения должны быть обязательно выполнены.

Домовладелец также нуждается в информации о том, кто может сделать работы по снижению концентрации радона от их имени. Поэтому списки специалистов должны быть созданы и поддерживаться региональными или местными органами власти. Информация в этом списке должна быть легко доступна для домовладельцев и владельцев собственности [95].

Обучение для профессионалов по снижению концентрации радона необходимо, чтобы гарантировать помощь. Также должны быть разработаны соответствующие учебные программы, как регулярная компонента национальных программ по радону.

В качестве меры эффективности радоновых программ, страны должны в идеале создать базы данных по всей стране, чтобы собрать информацию об измерениях радона и других аспектах, имеющих отношение к программе радона. Всякий раз, когда это возможно, собранная информация должна включать такие параметры, как уровень радона до и после реабилитации, строительства характеристики, тип восстановительных мер, затраты на установку, годовой работы и расходы на техническое обслуживание и другие преимущества или недостатки в здании (например, снижение влаги, трещины).

Кампании по информированию общественности должны поощрять домовладельцев в этих областях для проверки своих домов. Эта политика должна затрагивать целевые организации и сотрудников, занимающихся общественным здравоохранением, строителей, архитекторов, региональных и местных органов государственной власти и медицинское сообщество.

5. ПОСЛЕДСТВИЯ И РИСКИ ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ ОТ ОБЛУЧЕНИЯ РАДОНОМ

5.1 Структура доз облучения

Природная радиация формирует основной вклад в суммарную дозу, тем не менее 10% излучения имеет техногенное происхождение, в структуре которого 98% приходится на медицинскую сферу (диагностика и терапия). В большинстве случаев, радиоактивный газ радон является основным вкладчиком в общую дозу.

Основную часть дозы облучения от радона человек получает в закрытом помещении. Это объясняется тем, что в зимний период содержание радона в помещении, как показали измерения, значительно выше, чем летом, так как условия проветривания зимой значительно хуже. В регионах с умеренным климатом концентрация радона в закрытых помещениях в среднем в 5 - 8 раз выше, чем в наружном воздухе.

При этом основным фактором, влияющим на содержание радона в помещениях, является наличие естественных радионуклидов в конкретном геологическом пространстве (горных породах и грунтах), а также в строительных материалах, использованных в здании [63].

Истинная причина высоких доз облучения легких связана с радоном и с вдыханием его короткоживущих ДПР: RaA (^{218}Po), RaB (^{214}Pb), RaC (^{214}Bi) и RaC (^{214}Po). При дыхании радиоактивные аэрозольные частицы оседают в легких человека, как в фильтре. В организм человека радон также может попадать с питьевой водой и в процессе принятия душа или ванны в случае использования воды, содержащей радон. Расчеты, проведенные в разных странах, показали, что радон (вместе со своими продуктами распада (рис. 40)) формирует более половины дозы, которую получает человек от всех источников радиации (табл. 12).

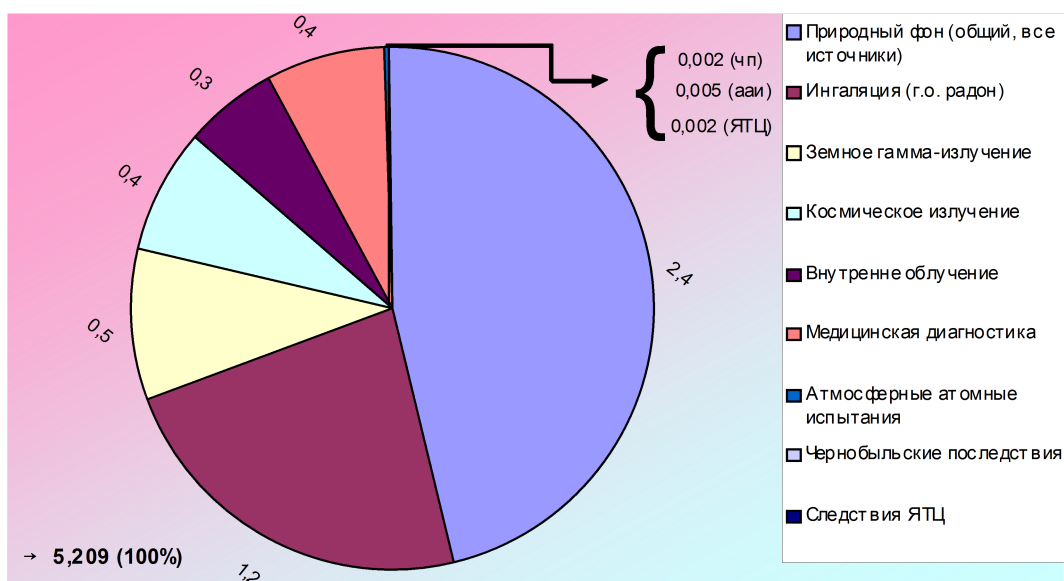


Рис. 40 – Источники среднего распределение ежегодной эффективной дозы (мЗв) от природных и техногенных источников радиации [161, 162]

Чтобы определить радиационную дозу на человека, необходимо знать количество поступающего в легкие людей ДПР радона и торона, вдыхаемых с воздухом.

Значения этих трех параметров зависят от ряда процессов, а именно:

1. выделение радона и торона из недр и строительных материалов, а также процесс их переноса в грунтах и воздухе;
2. образование радиоактивных аэрозолей путем осаждения ДПР радона,
3. поступление ДПР радона и торона в подпочвенный воздух и здания с накоплением внутри помещений;
4. турбулентная диффузия радиоизотопов в свободной атмосфере и воздухообмен в помещении.

Табл. 14 – Средняя ежегодная мощность дозы в США (10 мкЗв/год)

| Источник | Дозовый эквивалент | Эффективная доза | % от общего |
|---|--------------------|------------------|-------------|
| Природные | | | |
| Космическое | 27 | 27 | 8 |
| земное | 28 | 28 | 8 |
| Радон (может изменяться до 100 раз в определенных регионах) | 2400 | 200 | 55 |

| | | | |
|-------------------------------------|-------|-------|------|
| Внешнее | 39 | 39 | 11 |
| Всего природное | - | 294 | 82 |
| Техногенное | | | |
| Медицинское рентгеновское облучение | 39 | 39 | 11 |
| Медицинское радиоизотопное | 14 | 14 | 4 |
| Потребительские продукты | 10 | 10 | 4 |
| Другое | <0,01 | <0,01 | <0,3 |
| Всего техногенное | - | 63 | 19 |
| Общее (природное + техногенное) | | 360 | 100 |

5.2 Эффекты радона на здоровье

От типа излучения и энергии зависит характер и глубина воздействия излучения на ткани и органы человека. Неблагоприятные эффекты от экспозиции радоном вызваны преимущественно повреждением альфа-частицами. Возможные эффекты будут зависеть от уровня экспозиции. Главная опасность - увеличение риска рака легких. Риск развития рака легких возрастает линейно с возрастанием длительности экспозиции радона в беспороговой тенденции. Статистически установленное увеличение онкологических эффектов проявилось даже ниже концентрации 200 Бк/м³. Радон благородный газ, поэтому быстро эксгалируется после вдыхания. Однако, дочерние продукты распада, взаимодействуя с молекулами в воздухе и частицами пыли, аэрозолей или дыма и могут откладываться в дыхательных путях. Находясь на поверхностях легочной ткани, дочерние продукты распада эмитируют ионизирующую радиацию в форме альфа-частиц. Эксперименты подтвердили, что ионизирующая радиация взаимодействует с бронхиальными клетками эпителия и вызывает рак.

Существуют способы расчеты степени опасности радона для здоровья человека. Для Великобритании назывались цифры от 1500 до 2500 случаев рака легких в год. Специалисты Агентства по охране окружающей среды США считают, что в них ежегодно в результате действия радона от рака легких погибает от 7 до 30 тысяч человек. Шведский национальный радиационной совет

оценивает около 900 случаев рака легких в год от повышенной концентрации радона в жилых помещениях (при населении в 8,5 млн человек). Многие ученые считают влияние радона второй по значимости (после курения) причиной рака легких у человека. Поскольку радон считается после курения основным источником рака легких, во многих странах проводили и проводят широкомасштабные исследования радоновых рисков [65, 66, 70, 71, 73-74, 83, 92, 108, 120, 139, 140, 168]. Радон в воздухе домов вызывает около 20 000 случаев смерти от рака легких в Европейском Союзе (ЕС) каждый год. Это около 9% от общего числа смертей от рака легких в ЕС и около 2% смертей от рака в целом.

Результаты эпидемиологических исследований. Существует два основных источника данных по которым количественно оценивают риск для здоровья от действия радона [68, 111, 112]. К ним относятся: 1) шахтеры урановых шахт и 2) крупновыборочные целевые эпидемиологические исследования.

Эпидемиологические исследования тысяч горняков урановых шахт в различных странах подтверждают этот факт. Среди 68000 горняков выявлено 2700 смертей от рака легких. Причем увеличенный риск для всех гистологических типов рака легких, включая малые клетки карциномы, аденокарциномы и др. (рис. 40) Каждый год из более чем 15000 смертей от рака легких в США вследствие облучением радоном и 2500 смертей в Великобритании.

1. Почти все крупные эпидемиологические исследования рака легких у горнорабочих указывают на повышенную смертность в группах получавших кумулятивные экспозиции >120 WLM (8880 Бк/м³ год). Интерпретация кривой доза-ответ для альфа-частиц является сложным. Выявлено наличие линейной зависимости в области низких доз с насыщением при высоких уровнях воздействия ($>200-400$ WLM, 14,8 - 29,6 кБк/м³ год). С повышением доз до максимального значения степень генерации рака снижается. Дополнительная доза для преобразования клетки уже менее эффективна, так как пораженные клетки уже повреждены. Поэтому добавочные дозы либо не имеет никакого дополнительного эффекта, либо приводят только к гибели клеток.

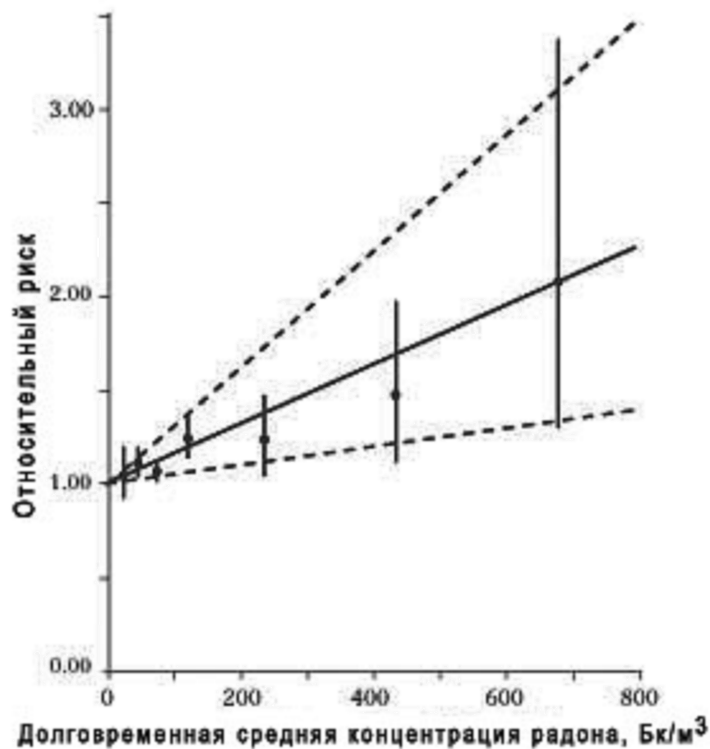


Рис. 41 – Риск рака легких как функция накопленной дозы

Другим аспектом эпидемиологического исследования является вывод о повышенном риске заболевания на рак легких, связанного с курением. Риск рака легких значительно увеличивается, когда экспозиция радона соединяется с курением. Курящие от облучения радоном имеют в 10 раз больше риск заболеть раком легких.

Концентрация радона намного выше в горных выработках. Требования к вентиляции в шахтах гласит о поддержании концентрацию радона в урановых рудниках на "рабочем уровне", с 95% доверительной вероятностью - 20,2 кБк/м³ (по результатам измерения с 1976 по 1985 год).

2. Жители домов, имеющие концентрацию 150 Бк/м³, могут накопить до 38 Бк/м³ год. Основным риском для здоровья от воздействия ДПР является риск заболеванием бронхогенной карциномой. Риск от рака легких от радона в домах может быть оценен двумя способами: а) прямыми эпидемиологическими исследованиями радона в жилищах и б) оценками проектируемого риска от низких уровней радона в домах.

Неопределенность связана с жилищными измерениями очень большая, чем при исследований горняков. Главным образом это связано с тем, что при малых экспозициях встречаемый в большинстве домов этот риск небольшой. Другая часть неопределенности связана с трудностью оценивания облучения от радона которые люди получают за свою жизнь; особенно для нескольких жилищ. Несмотря на все эти виды неопределенности, ясно что большинство случаев рака легких вызвано курением, нежели действием радона.

Для среднего периода человеческой жизни экспозиция от радона в 20 Бк/м³ в дом вызывает риск рака легких на уровне 0,3% (или 3 смерти на 1000 человек). Для сравнения, риск смерти от несчастного случая в доме 0,7% (7 смертей на 1000 человек).

Используя среднюю длительную радоновую экспозицию 28 Бк/м³ и оценки риска от, количество радон-индуцированных смертей от рака легких - от 4500 до 23000 при популяции 240 000 000 (США). Хотя неопределенность от факторов курения и ДПР, может наводить на мысль что случаи смертей от рака легких, вызванных радоном, переоценен. В любом случае, самый дешевый и наиболее эффективный способ уменьшить рак легких уменьшение или отказ от курения.

Около 22000 смертей от рака легких в год может быть связано с воздействия радона в США. Начиная с 70 лет приблизительно 75% времени человек проводит в доме с уровнем 150 Бк/м³ 50% равновесия между радоном и ДПР, что приводит к 4 кБк/м³ кумулятивного воздействия. Предполагая, что 18,5 Бк/м и 240 млн человек получаем результат в 60 миллионов человек 74 Бк/м³. В этой оценке находим 360 случаев смерти на миллион 74 Бк/м³ от рака легких (возрастно-усредненная степень для США), и вычисляем 21600 случаев смерти от рака легких из-за радона в год. МКРЗ дает диапазон 8600-25900 к этим оценкам. ЕРА оценило стоимость за спасенную жизнь (по предотвращению предсказанного рак легких от радона) для различных уровней действий, которые могут быть выбраны. Вычисленные значения лежат в пределах: от 1100000 долларов при 74 Бк/м³ до 0,7 млн долларов на 150 Бк/м³ и 0,4 млн при уровне ≈ 300 Бк/м³.

5.3 Оценка состояния радиационной безопасности

Для оценки состояния радиационной безопасности используется показатель радиационного риска. В наибольшей степени этот риск характеризует суммарная накопленная эффективная доза от всех источников излучения (табл. 15, 16). Значимость каждого источника излучения следует оценивать по его вкладу в суммарную эффективную дозу.

Табл. 15 – Оценки радоновых рисков

| Радоновый уровень, Бк/м ³ | Оценочное количество случаев смерти от рака легких из-за воздействия радона (на 1000 случаев рака легких) | Сопоставимые уровни воздействия | Сопоставимый риск |
|--------------------------------------|---|---|--|
| 7400 | 440-770 | В 1000 раз выше уровня вне помещений | Более чем 60 раз меньше риск у некурящий чем риск курящих 4 пачки в день |
| 3700 | 270-630 | В 100 раз выше среднего уровня внутри помещения | 20 000 рентген снимка грудной клетки в год |
| 1480 | 120-380 | - | Курильщик 2 пачки в день |
| 740 | 60-120 | В 100 раз выше среднего уровня вне помещений | Курильщик 1 пачка в день |
| 370 | 30-120 | В 10 раз выше среднего уровня в помещении | В 5 раз выше чем риск некурящего |
| 148 | 13-50 | - | 200 рентген снимков грудной клетки в год |
| 74 | 7-30 | В 10 раз выше среднего уровня вне помещений | Риск некурящего умереть от рака легких |
| 37 | 3-13 | Средний уровень | 20 рентген снимков |

| | | | |
|--------------------------------------|---|---------------------------------|----------------------|
| Радоновый уровень, Бк/м ³ | Оценочное количество случаев смерти от рака легких из-за воздействия радона (на 1000 случаев рака легких) | Сопоставимые уровни воздействия | Сопоставимый риск |
| | | внутри помещения | грудной клетки в год |
| 7,4 | 1-3 | Средний уровень вне помещений | |

Табл. 16 – Радоновые и соразмерные риски

| Уровень радона, Бк/м ³ | В случае если 1000 чел. были под облучением этим уровнем на протяжении всей жизни и могут заболеть раком легких, чел. | | Риск заболеть раком от воздействия радона сопоставим с ... | | Доступная радоновая реабилитация |
|-----------------------------------|---|-----------|--|---------------|--|
| | курящих | некурящих | Для курящих | Для некурящих | |
| 740 | ~260 | ~36 | выше риска утонуть в 250 раз | В 35 раз | Отремонтировать дом (бросить курить) |
| 370 | ~150 | ~18 | выше риска умереть от пожара в доме в 200 | В 20 раз | |
| 296 | ~120 | ~15 | выше риска умереть от падения в 30 раз | в 4 раза | |
| 148 | ~62 | ~7 | выше риска погибнуть от автомобильной аварии в 5 раз | 1 раз | |
| 74 | ~32 | ~4 | выше риска умереть от яда в 5 раз | 1 раз | |
| | | | | | Ремонт между действиями от уровней 2 и 4 |

| | | | | |
|----|-----|----|---------------------------------|--|
| 48 | ~20 | ~2 | Средний уровень радона в доме | Уменьшение радона ниже 2 уровня затруднительно |
| 15 | | | Средний уровень радона на улице | |

Срочность принятия противорадоновых мер. Очевидно, что уровни радона должны быть как можно больше снижены. Практически радоновые уровни в большинстве домов может быть уменьшена до примерно 150 Бк/м³. Срочность принятия мер возрастает при более высоких концентрациях радона. Чем выше уровень радона в доме, тем быстрее следует принять меры для уменьшения воздействия.

В случае, если результаты примерно равны или выше 7400 Бк/м³. Экспозиция в этом диапазоне явно выше той, которая наблюдается в домах. Жильцы должны предпринять действия для снижения уровня ниже 7400 Бк/м³, насколько это возможно. Рекомендуются, чтобы меры были приняты в течение нескольких недель. Если это не представляется возможным, проводятся консультации для определения способа уменьшения уровней.

В случае, если результаты примерно от 740 до 7400 Бк/м³. Воздействие в этом диапазоне считается значительно выше среднего для жилых зданий. Действия должны быть предприняты для снижения уровня ниже 740 Бк/м³, в течении нескольких месяцев.

В случае, если результаты примерно от 148 до 740 Бк/м³. Воздействие в этом диапазоне считается выше среднего для жилых зданий. Действия должны быть предприняты для снижения уровня примерно 148 Бк/м³ или ниже в течение нескольких лет.

В случае, если результаты примерно 148 Бк/м³ или ниже. Экспозиция в этом диапазоне считается средней или чуть выше среднего для жилых зданий. Хотя риски в этом диапазоне нужно учитывать, в то же время, снижение уровней на таком низком уровне может быть проблематичным, а иногда и просто невозможным.

Опыт ЕРА показывает, что нет полного успеха в стимулировании домовладельцев для измерения уровня радона в своих домах, которые были бы первым шагом в процессе

принятия решения в радоновой реабилитации, если обнаруживается высокий уровень радона. Трудно заставить людей обеспокоиться проблемой потенциального источника скрытой опасности. Кроме того, еще не удалось сформулировать убедительные данные о повышенном риске на уровне 148-296 Бк/м³ или ниже.

Следующий этап радоновой реабилитации, основывается на индивидуальном отношении к приемлемому риску, принятию соответствующих мер в зависимости от их ресурсов и потребностей. То есть, предстоит выбор с множества дорогих вариантов наиболее приемлемого. Соотношение затрат/выгод для реабилитации радона должно быть тщательно рассмотрено. Опыт свидетельствует, что расходы на радоновую реабилитацию превышают ожидаемые потенциальные выгоды при уровнях радона менее 296 Бк/м³.

5.4 Механизмы вхождения радона в здания

Источники поступления радона в помещения. Поскольку радон постоянно поступает с земной поверхности, он всегда присутствует в воздухе, но при определенных обстоятельствах концентрация радона в здании может быть значительно увеличена относительно нормального внешнего уровня (уровня в свободной атмосфере). Большинство зданий имеют ограниченное внутреннее воздушное пространство с медленным воздухообменом с внешним воздухом. Следовательно, концентрация любых частиц или газов, поступаемых в атмосферу здания будет стремиться к увеличению выше концентрации наружного воздуха. Как правило, она в 2-3 (и больше) выше, чем на открытом воздухе. Уровень ЭРОА радона в подвалах и первых этажах может достигать нескольких тысяч Бк/м³. Концентрация ДПР будет постепенно увеличиваться по мере распада радона внутри здания.

Главные источники поступления газа радона в воздух помещений: почвенный газ, строительные материалы, вода (табл. 17, 18).

Табл. 17 – Приблизительный вклад от источников радона в домах

| Источник | Оценочный вклад (активность на секунду) |
|--------------------------------------|---|
| Перенос почвенного газа (<i>b</i>) | 0 - 6 Бк |
| Испускание с воды | 0 - 2 Бк |
| Диффузия почвенного газа | 0,1 - 0,2 Бк |
| Диффузия с строительных материалов | 0,01 - 1 Бк |

В общем случае источниками поступления радона в помещения, как известно, являются различные горные породы и зоны разломов, находящиеся под фундаментом здания, строительные материалы, водопроводная вода, природный газ и подпочвенный воздух. Подпочвенный радон и торон могут поступать в помещения также диффузионным путем по микротрещинам и порам в цементных перекрытиях, и через системы ввода в здания воды и тепла [52]. Оценка скорости поступления этих газов в помещение может быть проведена, в общем случае, когда известна скорость его эксгаляции из подстилающих почв Q_n .

Если принять средние значения для: постоянной распада ^{222}Rn , $\lambda_{\text{Rn}}=2,1 \cdot 10^{-6}$ с; удельной активности радия ^{226}Ra в почве, $C_{\text{Ra}}=25$ Бк/кг; коэффициента эманирования, $K=6,15$; плотности почв, $\rho_n=1,6 \cdot 10^6$ кг/м³; длины диффузии радона в почве, $L_{\text{Rn}}=1$ м, то скорость эксгаляции составит $Q_n=1,7 \cdot 10^{-2}$ Бк/(м²·с). Плотность потока радона Q_p , обусловлена его диффузией через плиту перекрытия толщиной 0,2 м, составит $Q_p=1,2 \cdot 10^{-3}$ Бк/(м²·с) [14].

Уровни ЭРОА радона в воздухе помещений зависит от уровней его ОА в подпочвенном воздухе и климатических условий, конструкции и материалов зданий и системы их вентиляции (кратности воздухообмена). В частности, для главного фактора поступления радона в помещения, почвы - разработана математическая модель (приблизительная) для подсчета уровней радона внутри помещений от величины Q_n [54]

$$C_m = \frac{C_i Q_n}{(n+\lambda)V} \quad (5.1)$$

где C_m - количество вклада радона в воздух внутри помещений от эксгаляции радона; C_i - концентрация радона в

почве; Q_n - скорость эксгаляции радона из подстилающих почв; n - кратность вентиляции; λ - постоянная распада радона; V - объем воздуха внутри помещений.

Разрабатываются модели, где здание рассматривается как состоящие из двух частей: подвальной (подпольного пространства) и жилой. Радон поступает в подвал непосредственно из подстилающих здание грунтов, накапливается в подвале и далее проникает в жилые комнаты.

В модели приняты допущения о том, что происходит практически мгновенное перемешивание радона в воздухе помещений, а процесс является динамичным и скорость воздухообмена превышает скорость распада радона. Сочетание этих процессов приводит к формированию определенных уровней ЭРОА радона в помещениях зданий [27].

Для определения поступления в подвал радона из грунтов рекомендуется одна из моделей, выражающаяся соотношением [27]:

$$Q = \frac{K}{F_s V \Delta P}, \quad (5.2)$$

где V – скорость выхода радона из грунта; K – проницаемость грунтов; F_s – динамическая вязкость грунтов; ΔP – градиент давлений.

Почва - основной источник радона внутри помещений.

Высокие концентрации радона в почвенном газе в почвах с высокой транзитной эффективностью (пустоты, поры, сухие почвы) могут привести к повышенной концентрации радона в зданиях.

Табл. 18 – Среднее содержание радона и радия в грунтовом воздухе на глубине 1 м

| Тип грунтов | ^{226}Ra , Бк/кг | ^{222}Rn , кБк/м ³ |
|---|---------------------------|--|
| Морены, обыкновенные | 15-50 | 6-50 |
| Морены с гранитными включениями | 30-75 | 20-60 |
| Морены с гранитными включениями, богатыми ураном | 75-350 | 40-200 |
| Гравий и крупные пески в гляциофлювиальных отложениях | 20-75 | 10-150 |
| Пески и валунные глины | 5-25 | 4-20 |

| | | |
|--------------------------------|----------|---------|
| Илы | 10-50 | 20-60 |
| Глины | 25-100 | 10-120 |
| Почвы содержащие черный сланец | 175-2500 | 50-1000 |

Из в общей сложности 1,6 млн домов в Швеции, около 40 000 из них имеют ДПР превышающие 400 Бк/м³. В Швеции уровень радона в 400 Бк/м³ принят как предел разрешенной концентрации ДПР в жилищах. В большинстве этих домов, радон имеет почвенное происхождение, причем радон в почвенном газе всегда сгенерирован *in situ*, в почвенных горизонтах. И только в исключительных случаях радон транспортируется с глубин. В таких случаях уровни радона в жилых домах превышают значения, измеряемые в урановых рудниках. Эта ситуация наблюдалась в том случае, где дом находился над глубокой трещиной в гранитном массиве [153]. Радон, поступающий из трещины, через почву формировал высокий уровень в подполе и вокруг дома, а потом и проникал в дом (рис. 42).

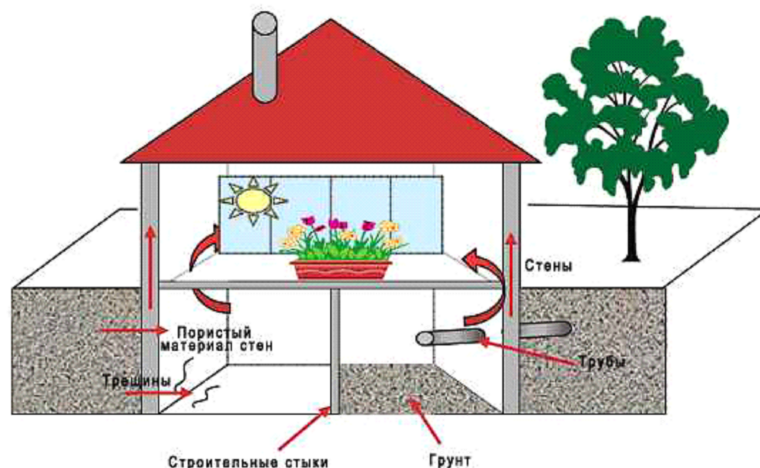


Рис. 42 – Пути попадания радона внутрь помещений

Относительно уровней радона в почвенном газе, то на глубине 1 м на может достигать предела - от 5 000 Бк/м³ в песках до 700 000 Бк/м³ в алунитовых сланцах, а в помещениях варьироваться от 20 до 20 тысяч Бк/м³. Важным результатом этих исследований является четкая взаимосвязь между содержанием урана в почве и уровнем радона в домах. Чем выше содержание урана, тем больше риск обнаружить высокие уровни радона в помещении, безосновательно от дома или типа фундамента. Хотя

не проявляется заметной выраженной корреляции содержания радона в почвенном газе с содержанием радия в почве.

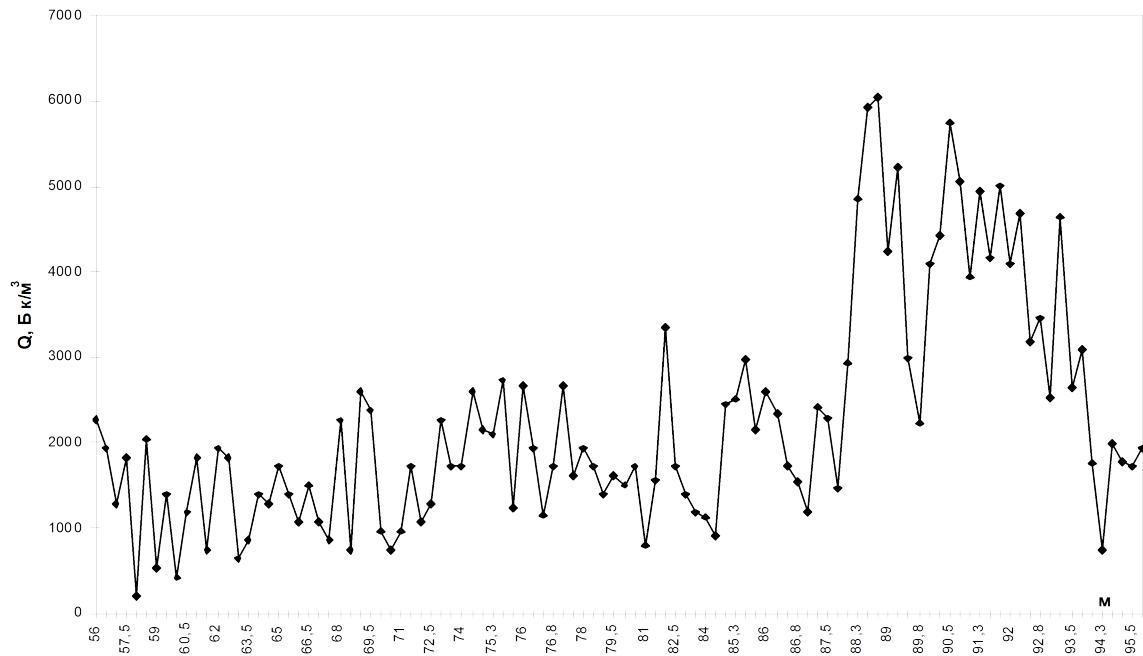
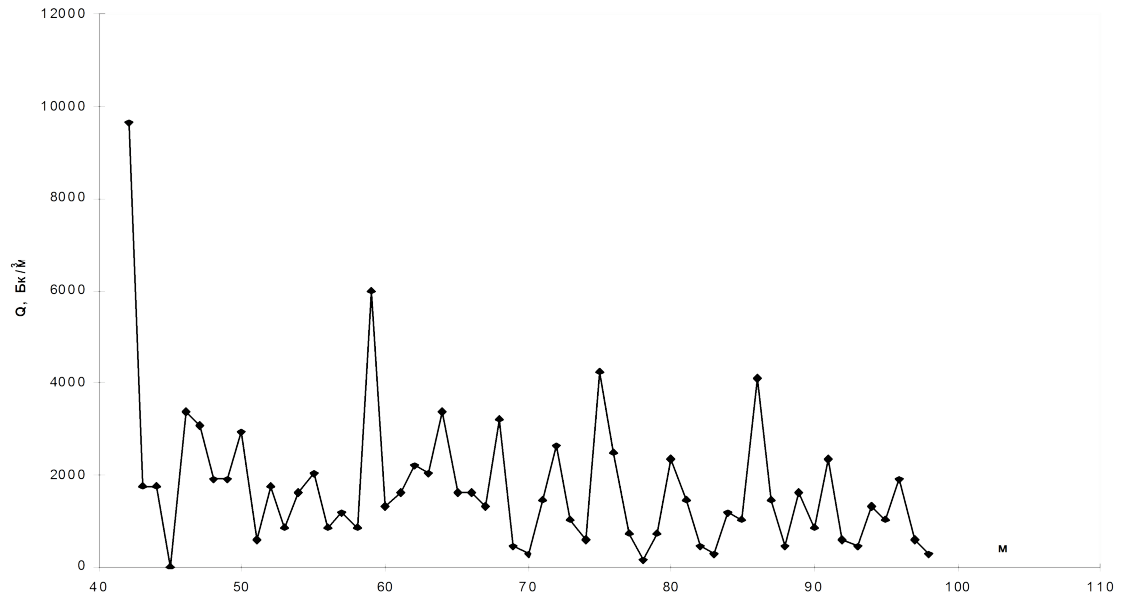
Региональные исследования распределения радона в почвенном воздухе. На геоэкологическом комплексе «Бучанский» находящийся в рекреационной зоне г. Киева, Украина, во время исследовательских работ 1998-2000 годов были найдены ряд крупных радоновых аномалий в почвенном воздухе. Величина активности радона на некоторых участках была в 3 и более раз выше за фоновую величину. Наиболее четко аномалии проявились на профилях 26, 17, 3 ГЭК "Бучанский" (рис. 43). Для определения параметров выделенных аномалий применялись многочисленные повторные (>20 раз) измерения с целью определения количественных параметров, природы и других особенностей аномалий.

Радоновые аномалии в подпочвенном воздухе характеризуются локальными в плане максимумами, которые оконтриваются в виде узких полос, имеют высокий вертикальный градиент концентрации эманации в эпицентре. Интенсивность аномалии этого типа испытывает резкие сезонные колебания, иногда отмечается расширение площади аномалии в направлении движения подземных вод, иногда аномалии могут исчезать совсем.

Здесь также наблюдались значительные колебания радона по сезонам и годам наблюдений. Абсолютные значения активности радона лежат в пределах от 972 до 10976 Бк/м³. Характерным отличием этого аномального радонопроявления является неустойчивость во времени, иногда наблюдалась потеря высоких значений в течение суток с последующим увеличением при последующих измерениях.

Вторым типом радонопроявлений являются маловариабельные радоновые аномалии в подпочвенном воздухе. Значение активности лишь незначительно изменяется под влиянием климатических факторов. Абсолютные отметки (в Бк/м³) аномалий лежат в пределах: для первого участка - от 1000 до 3500; для второго - от 1500 до 4250. Природа повышенных значений радона обусловлена увеличением эманацирующей способности коренных пород вдоль зон разломов и трещин, благоприятных для миграций эманаций. Миграция же радиоактивного газа, скорее всего, происходит не газовым, а водно-флюидным способом.

На территории г. Киева радоновые аномалии в подпочвенном воздухе ряда зон тоже имеют сложную конфигурацию. Это, вероятно, связано с разной степенью трещиноватости подстилающих горных пород, особенно - в местах пересечения разломов - тектонических узлах [27].



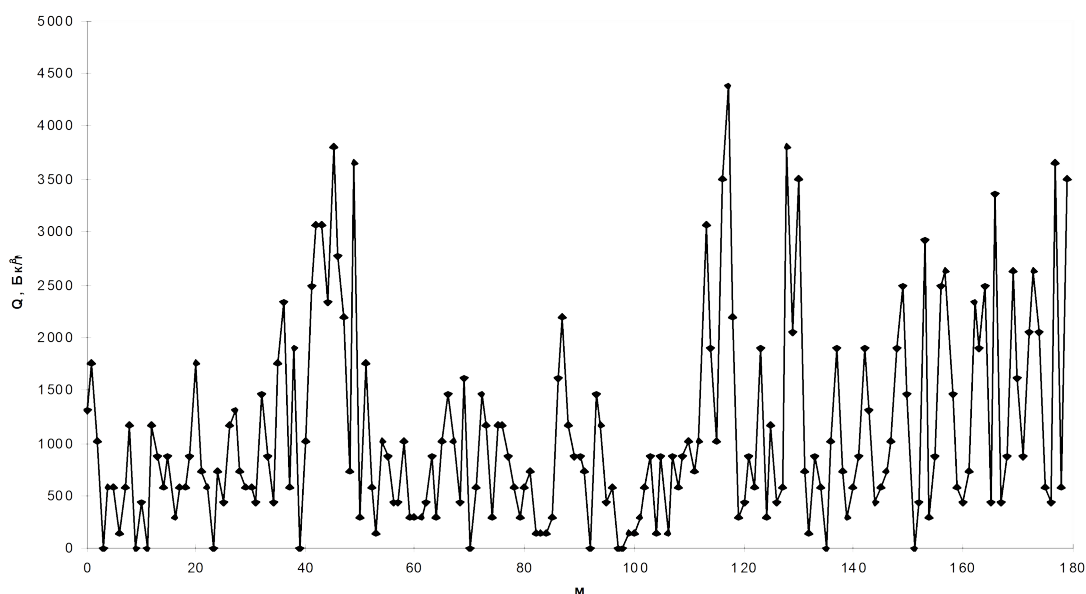


Рис. 43– Усредненные кривые удельной активности радона в почвенном воздухе по ПР26, ПР17 и ПР3 ГЭЖ Бучанский (окрестности г. Киева, Украина)

Согласно данным [27], уровни ОА радона и торона в почве г. Киева в среднем колеблется в пределах по ^{222}Rn 0,8 - 9,5 кБк/м³; по ^{220}Rn 1,9 - 19,2 кБк/м³.

Более сложной выглядит задача изучения радоноопасности в экологически неблагоприятных и геологически неоднородных регионах. В г. Желтые Воды (Днепропетровская область, Украина) были проведены радоновые изыскания, радиологическая обстановка которого определяется наличием вблизи города Желтореченского месторождения урана, мощностей по переработке на гидрометаллургическом заводе урановых руд, участков накопления радиоактивных отходов в хвостохранилищах, а также наличием в пределах территории города эманлирующих коллекторов - Ольховской тектонической зоны и Западного разлома.

Оценены уровни радоно- и тораноопасности в 2625 домах частного сектора, в ряде школ и дошкольных учреждений. В 70% обследованных помещений уровни ЭРОА радона выше 100 Бк/м³, в том числе 3,5% имеют ЭРОА выше 1000 Бк/м³. В ряде детских дошкольных учреждениях ЭРОА радона на первых этажах достигает 248-411 Бк/м³. При этом ЭРОА радона на первом этаже, как правило, достигает 50-60% от уровня ЭРОА радона в подвале и зависит от воздухопроницаемости перекрытий и вентиляции.

Детализационные исследования распределения радона в почвенном воздухе г. Усть-Каменогорск. Повышенные значения концентрациями радона в надпочвенном газе более чем 100 Бк/м³ типичны для почв на гранитах и силикатных вулканитов, а также в местах скопления техногенных образований с радиоактивными отходами. Поэтому, на

участках где в воздухе помещений жилого и социального назначения устанавливаются уровни, превышающие нормативные значения, с целью выяснения причин эманаций радиоактивных газов, а также выяснения положения их источника необходимо производить детализационное картирование распределения радона в почвенном воздухе. Представляется, что наиболее рационально такое картирование выполнять в масштабе 1:5000.

Методика детализационного картирования распределения радона в почвенном воздухе в масштабе 1:5 000 заключалась в том, что в начале на основании рекогносцировочных геохимических исследований, а также измерения эквивалентной равновесной объемной активности дочерних продуктов радона и торона в воздухе помещений ЭРОARn + 4,6 × ЭРОATh выбирался участок с наиболее аномальными значениями указанных величин. Таковой является территория университетского кампуса в районе главного корпуса Восточно-Казахстанского технического университета им.Д.Серикбаева. Она была выбрана в качестве эталонной для отработки методики по картированию распределения радона в почвенном воздухе в пределах г. Усть-Каменогорска. Изначально в пределах аномальной территории, где накоплены исторические радиоактивные техногенные образования, была разбита сеть опробования с шагом 50 метров. В опорных точках вручную пробивались шпуров глубиной 0,7-1,0 м. В шпур помещался зонд (воздухоотборник). Обращалось особое внимание на то, чтобы при отборе пробы не было подсоса воздуха в воздухопробник из атмосферы. Измерение концентраций радона выполнялось в следующей последовательности: воздухопробник устанавливался в шпур, стенки которого хорошо герметизировались. Воздухопробник находился в шпуре в течении суток.

Измерение объемной активности радона в почвенном воздухе основано на отборе пробы почвенного воздуха из шпура в пробоотборник, определении объемной активности радона в пробоотборнике путем перемешивания пробы между объемами пробоотборника и измерительной камеры и последующем измерением объемной активности радона в измерительной камере блока измерения объемной активности.

В отношении фоновых значений объемной активности в почвенном воздухе по результатам проведенных исследований трудно дать заключение, поскольку работы производились в пределах территории, где почвы загрязнены радиоактивными отходами и здесь на площади свыше 10 гектар отмечается повышенный уровень радиации. Поэтому, колебания измеренных значений составляют от 2145 до 41646 Бк/м³.

Базируясь на международном опыте по радиационной безопасности, технических требований к строительным нормам касательно концентраций радона в почвенном воздухе, фоновый природный уровень объемной активности радона в почвенном воздухе можно считать на уровне

204 Бк/м³. Исходя из этого во всех точках наблюдения на изученной территории уровень данной величины превышен как минимум на порядок (рис. 44).

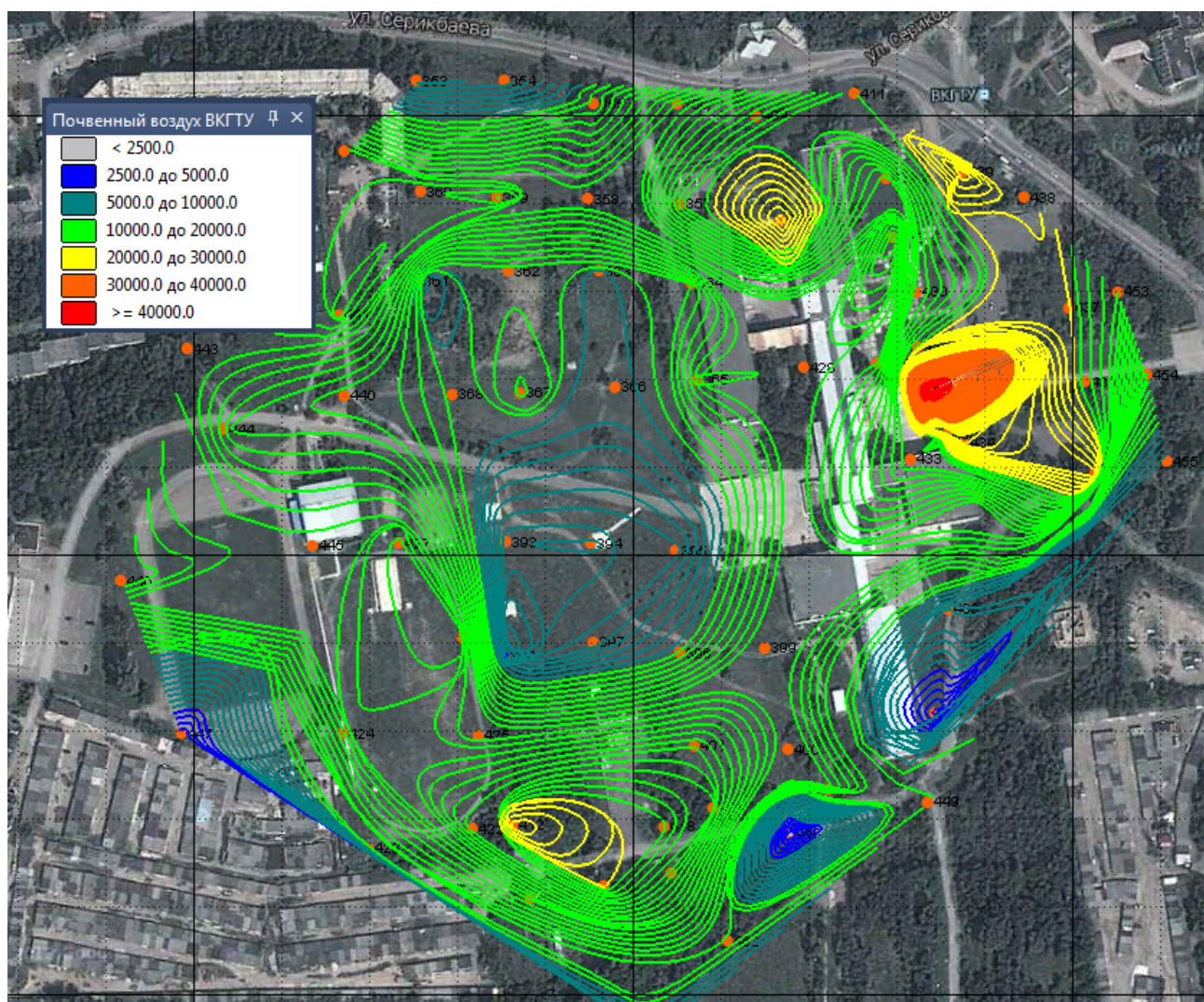


Рис. 44 – Особенности пространственного распределения объемной активности радона (в Бк/м³) в почвенном воздухе в пределах кампуса главного корпуса Восточно-Казахстанского государственного технического университета им.Д.Серикбаева

Почти по всей изученной территории, за исключением двух небольших участков (перед корпусом Д и к востоку от спортивной площадки (синие и сини-зелёные изолинии) значение объемной активности радона в почвенном воздухе превышает 10000 Бк/м³.

Наиболее высокие уровни, превышающие значения 20000 Бк/м³ установлены в пределах автозаправки ТОО «Штифт», между корпусами Г-1 и лабораторным, вблизи автобусной остановки и на площади перед входом в главный корпус. На последней территории установлено максимальное значение объемной активности радона.

При анализе пространственного распределения объемной активности радона в почвенном воздухе и данные карт радиационной обстановки, радиоактивности почв объемной активности тория (^{232}Th) и радия (^{226}Ra) на глубине до 1 метра устанавливается тесная корреляция между этими закономерностями. Особенно наиболее высокие содержания радона установлены в местах наибольшей объемной активности радия, что обусловлено накоплением в этих местах наиболее радиоактивных техногенных образований или наибольшего их количества.

В тоже время на юге изученной территории, ближе к гаражному кооперативу и автозаправке ТОО «Штифт» загрязнения техногенными радиоактивными образованиями по данным предыдущих исследований не установлено. Однако значения объемной активности на данном участке достигают 20434 Бк/м^3 . Учитывая то, что и воздухе гаражей уровень ЭРОА радона и торона также довольно высокий (свыше 500 Бк/м^3), можно предположить, что здесь также накоплены радиоактивные техногенные образования, не установленные предыдущими исследователями.

Поэтому эманационная съемка является более чувствительным инструментом в силу повышенной миграционной способности радона как газа.

Подтверждается предположение, что в пределах радоноопасных зон и полей с уровнями ОА радона в подпочвенном воздухе выше $15\text{-}20 \text{ кБк/м}^3$ уровень ЭРОА радона в помещениях зданий разного назначения, как правило превышает 100 Бк/м^3 [25].

Содержание радона в почвенном воздухе всегда избыточно для того, чтобы давать высокие уровни ДПР. Но контролирующими факторами формирования высоких радоновых уровней в помещениях является не концентрация радона в почвенном газе, а условия для его проникновения в дома и/или наличие достаточного количества объема воздуха в почве для поддержания активного транспорта в воздух помещений. Возможность транспорта радонсодержащего почвенного воздуха определяется главным образом проницаемостью почвы. Если есть достаточно воздуха с содержанием радона, доступного с почвенных горизонтов для поддержания непрерывного потока радона в здание, как это было бы в гравия и песка, то контрольные пределы легко могут быть превышены.

То есть, приведение к повышенным или высоким уровни радона в помещении от радонового потенциала почвы,

необходимо, что бы земля под домом была проницаемой, и наличествовал определенный объем почвенного воздуха, достаточного для поддержания транспорта радона в дом. Если объем доступного воздуха слишком мал, любой воздух, который всасывается в дом из-под фундаментов будет заменяться атмосферным воздухом. Содержание радона в почвенном слое поэтому быстро упадет до уровня, которого будет недостаточно, чтобы иметь значительное воздействие на воздух в помещении.

Уровни радона из почвенного газа отличаются друг от друга на небольших площадях. Поток радона под влиянием перепада давлений является основным средством транспорта эманации из почвы в здания, вследствие того, что давление внутри зданий, как правило, ниже, чем в почве, особенно в зимний период времени. Теоретически описано, что только диффузионное перемещение радона от почвы не может привести к высоким радоновым уровням в помещении (выше контрольного уровня в 200 Бк/м^3), если содержание газа радона почвы очень высоко ($>100\ 000 \text{ Бк/м}^3$), или если дом не очень хорошо изолирован от земли (например, земляной пол подвала) [54, 61, 64].

Дома без барьера между почвой и внутренним пространством (земляной пол в подвале или подполе) особенно уязвимы. Дома с пористыми фундаментами (блочный бетон, плиты) представляют только незначительный барьер для потока радона. Даже дома с монолитной бетонной заливкой подземных этажей и фундаментов, как правило, имеют стыковочные швы, полости, трещины, инженерные коммуникации и канализацию, через которые радон может проникать в дом. Почвенный газ с радоном проникает в дома через трещины или отверстия в фундаментах из-за более низкого давления воздуха в помещении по сравнению с внешней стороной дома.

Из-за малого периода полураспада поступление почвенного торона можно считать незначительным. Однако если пол выполнен из проницаемых материалов или со щелями, то поступление торона из почвы может оказаться сопоставимым с радоном. Истинные данные об активностном распределении дочерних продуктов радона и торона можно получить только при непосредственных измерениях, проверенных внутри помещений и вне зданий.

Накопление радона и торона происходит наиболее интенсивно за счет перепада давления воздуха в помещениях здания и атмосферы. Этот перепад оценивается в среднем величиной около 5 Па и обусловлен двумя причинами: ветровой нагрузкой на здание (разрежение, возникающее на границе воздушной струи) и перепадом температур между комнатным воздухом и атмосферой.

Концентрации радона в разных помещениях зданий крайне неравномерны; для различных типов зданий они изменяются в очень широких пределах [27].

Задача. Определение количества радона, которое попадает в воздух помещений из почвы.

Пример. Используем формулу 5.1. Если содержание газа радона в почве составляет 50 000 Бк/м³, скорость воздухообмена в доме - 0,5 в час, то количество утечек из почвы не должно быть больше 0,3% от общего количества воздуха в потоке, если уровень RnD в помещении не превышает 70 Бк/м³ (условный предел для новых домов). Если уровень RnD не превышает 400 Бк/м³, то количество почвенного газа в потоке не должно превышать 1,6% от общего количества воздуха в потоке (табл. 19).

Табл.19 – Границы поглощения радона в почвенном воздухе дома объемом 500 м³, если RnD уровни не превышают границы 0,7 и 0,4 кБк/м³ (предполагается фактор равновесия 0,5 между RnD и Rn) [54]

| Уровень ДПП | Скорость воздухообмена 0,5/час | | Скорость воздухообмена 0,5/час | |
|---|------------------------------------|---|------------------------------------|--|
| | Поглощение, м ³ /час | Содержание Rn в почвенном воздухе, Бк/м ³ | Поглощение, м ³ /час | Содержание Rn в почвенном воздухе, Бк/м ³ |
| Максимально 70 RnD Бк/м ³ | 0,07 | 500 000 | 0,03 | 500 000 |
| | 0,35 | 100 000 | 0,14 | 100 000 |
| | 0,7 | 50 000 | 0,3 | 50 000 |
| | 0,35 | 10 000 | 1,4 | 10 000 |
| Максимально 400 RnD Бк/м ³ | 0,4 | 500 000 | 0,16 | 500 000 |
| | 2,0 | 100 000 | 0,8 | 100 000 |
| | 4,0 | 50 000 | 1,6 | 50 000 |
| | 20,0 | 10 000 | 8,0 | 10 000 |

Коммунальное или индивидуальное водоснабжение также

может быть путем поступления радона в том случае, если есть значительное количество радона в подземных водах и водоснабжение дома происходит непосредственно из глубоких скважин.

Приблизительно 99% облучения от радона формируется в воздухе, около 1% приходит с питьевой водой. Большая доля этого 1% облучения связано с эксгаляцией радона при водопользовании: принятием ванны, душа или уборкой. И только 0,1% облучения связано с потреблением воды. Хотя эффекты поглощенного радона не вполне ясны, подсчеты подсказывают, что большее количество радиационной дозы такого источника поглощается в желудке.

Различия в режиме использования воды, вентиляции и воздушного потока могут привести к значительным временным вариациям в уровнях радона в помещении.

Больше всего радона фиксируется в воздухе кухонь и ванных комнат, где происходит его выделение из воды и при ее разбрызгивании. Перемешивание воды в раковинах, душе, туалете, перемешивании и нагревании в стиральных и посудомоечных машинах также является источником повышенных уровней радона в доме. Количество переведенного в воздух помещения радона зависит от содержания его в воде (этот показатель широко варьируется между регионами) и используемого количества воды в домохозяйстве (типичные значения лежат в пределах от 70 до 250 литров в день).

При обследовании домов в Финляндии было установлено, что концентрация радона в ванных комнатах в 3 раза выше, чем в кухнях, и в 40 раз выше, чем в жилых помещениях. Использовалась вода с повышенной концентрацией радона. Всего за 20 - 25 минут пользования душем концентрация радона в душевой комнате достигает величины, которая в 50 раз превышает фоновую концентрацию. В результате суммарная доза радиационного воздействия на человека при использовании воды с повышенной концентрацией радона для питья и других целей может оказаться достаточно высокой [27].

В среднем 70% радона, содержащегося в бытовой воде поступает в воздухе помещений (табл. 20).

Табл. 20 – Вклад различных видов деятельности в активность радона в воздухе помещений, %

| | | | |
|--------------|-------|--------|-------|
| Мытье посуды | 95 | Туалет | 30 |
| Душ | 60-70 | Стирка | 90-95 |
| Ванная | 30-50 | Питье | 10-45 |

Радон, растворенный в подземных водах является вторым наиболее важным потенциальным источником атмосферного радона. Риск возникновения рака от радона дегазированной из воды (душ, посудомоечная или стиральная машины и т.д.) обычно выше, чем риск от употребления воды, содержащей радон. Общепринятый для Северной Америки коэффициент перевода радона с воды в воздух жилых помещений - $1,0 \times 10^{-4}$. В большинстве исследований для разных регионов установлено, что количество радона, выделяемого в воздух в помещении от водных источников гораздо меньше, чем радона, приходящего от наземных источников под домами. Тем не менее, в большинстве мест, это незначительный источник воздействия на человека с учетом небольшой поглощенной дозы после перорального приема.

По данным шведских ученых, более 60000 шведов ежедневно потребляют воду с ОА радона-222 выше 1000 Бк/дм^3 , что приводит к дополнительным 50 случаям заболеванием рака в год. В некоторых местах, где используется вода из высокорadioактивных глубоких скважин, он может быть существенным фактором. Как, например, в Мэн, Нью-Гемпшир, в некоторых регионах Аппалачи и Флориды, концентрации, обнаруженные в некоторых колодцах домохозяйств, превышает 370 кБк/м^3 .

Таким образом использовании воды с повышенным содержанием радона в домах могут повышаться уровни радона за счет дегазации его из воды. Но в большинстве случаев, уровень концентрации радона в поверхностных водах, как правило, очень низкий (табл. 19), а муниципальные водоснабжение, как правило, вентилируется. Это приводит к значительному снижению уровней радона. С другой стороны, сельские колодцы, вода из которых используется для бытовых нужд, являются потенциально более серьезной проблемой.

Региональные радиогидрохимические исследования в Казахстане. На территории г. Усть-Каменогорск, РК для определения основных природных источников радона проведены радиогидрохимические региональные исследования масштаба 1:50000 с выявлением аномалий радона (^{222}Rn) и торона (^{220}Rn). В пределах изученной территории для получения сопоставимых результатов опробовались в основном поверхностные водотоки малых рек и ручьев (рис. 45). Для измерений использовался радонметр «Альфарад Плюс».

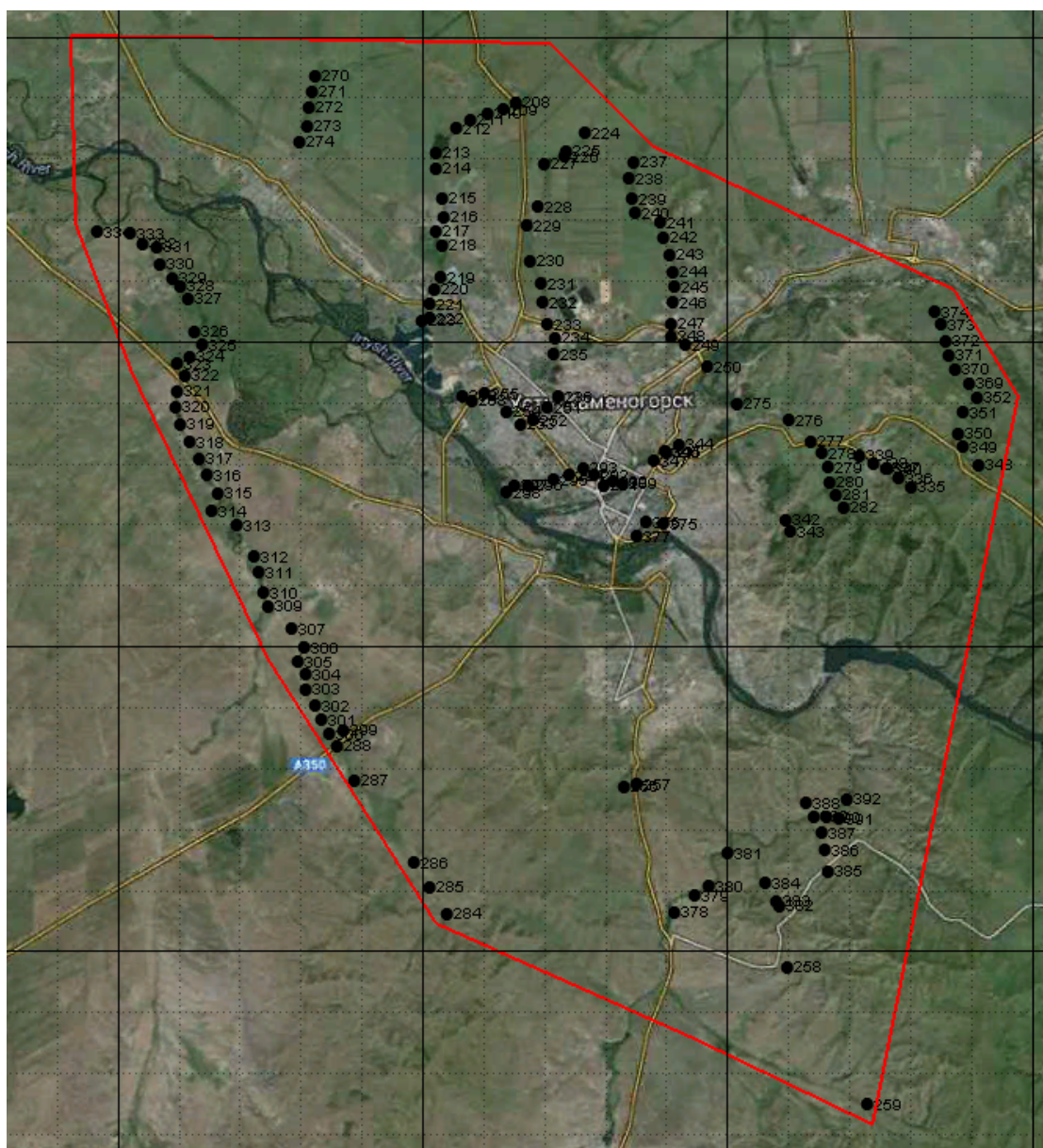


Рис. 45 - Схема опробования поверхностных водах малых рек в пределах изучаемой территории (красный контур)

Измерялась объемная активность (ОА) в пробах воды. Данные измерения основаны на использовании "классического" циркуляционного

способа перевода радона вместе с воздухом из объема пробы в рабочую камеру блока измерения ОА в процессе барботирования.

Исходя из полученных в ходе рекогносцировочных радиогидрогеохимических исследований, значения ОА радона в поверхностных водах малых рек г. Усть-Каменогорска и его окрестностей колеблются от 0 до 2463 Бк/л. При этом среднее значение фонового уровня данной величины при применении непараметрических статистических методов оценивается на уровне 6 Бк/л. Граница между первым аномальным значением и фоновым уровнем определяется в 35 Бк/л.

Базируясь на граничных данных последующих аномальных популяций на основе сформированной геоинформационной системы были построены карты распределения объемной активности радона в поверхностных водах в пределах изученной территории (рисунок). При этом основой послужила геологическая карта, позволившая выявленные радоновые аномалии сопоставить с геологическим строением г. Усть-Каменогорска и его окрестностей.

В результате удалось оконтурить ряд аномалий, большинство из которых контролируются определенными геологическими формациями или тектоническими структурами. Так севернее г. Усть-Каменогорска выделяется ряд линейных аномалий прослеживающихся вдоль тектонического контакта между блоком древних протерозойских образований, представленных гранито-гнейсами и хлорит-серицитовыми сланцами пугачевской свиты силур-верхнедевонского возраста. Сами гранито-гнейсы характеризуются повышенными содержаниями урана и тория, поэтому являются потенциально радононосными. Изученные водотоки дренируют их и, как правило, ниже по течению характеризуются повышенным уровнем объемной активности радона. Тектонический контакт является причиной повышенной трещиноватости пород, что формирует проницаемую зону, благоприятную для эманаций радона к поверхности и насыщению ним поверхностных вод. Это процесс усиливается также благодаря крупному региональному секущему разлому северо-западного простирания, вдоль которого отмечается смещение аномалий радона в пределах выхода гранито-гнейсов. Таким образом, синергизм двух геологических факторов: наличие уран-торийсодержащих пород и их повышенной трещиноватости привело к формированию серии линейных аномалий радона. В большинстве случаев в их пределах объемная активность радона достигает уровня 100-150 Бк/л, что характеризует поверхностные воды в данной местности как очень слаборадоновые.

Вторая группа аномалий локализуется в пределах пойменных отложений рек Ульба и Иртыш, на северной окраине промзоны г. Усть-Каменогорска. По всей вероятности, их генезис обусловлен проницаемыми зонами горных пород вдоль региональных тектонических разломов,

поскольку данные аномалии пространственно сопряжены с ними. Тем не менее близость промзоны с урановым производством не исключает техногенное происхождение данных аномалий. Такой же генезис может быть и у двух аномалий локализуемых в пределах жилых зон в районе Бабкина Мельница - Тополевая роща и районе дачного массива между улицами Пограничная и Целинная.

В пределах южных пригородов г. Усть-Камеогорска в поверхностных водах малых рек установлено еще ряд аномалий радона, которые приурочены к крупному региональному Калба-Нарымскому разлому и его оперяющих структур, а также выходам гранито-гнейсов в пределах Чечекского массива. Калба-Нарымский разлом является региональной тектонической структурой, разделяющей Калба-Нарымский террейн и Иртыш-Фуюнскую зону, характеризующимися крайне различным профилем земной коры, что обуславливает его глубинную природу. Именно к данному разлому приурочены аномалии радона, которые характеризуются довольно высокой объемной активностью, достигающей максимально установленных значений 2463 Бк/л у села Украинка. Такие воды можно отнести к радоновым средней концентрации. А учитывая, что поверхностные воды интенсивно теряют радон за счет процессов аэрации, то можно предположить, что в данном районе локализуется довольно мощный радоновый источник, природу которого планируется изучить на последующих этапах исследований.

В отличие от радона, торон менее распространенный изотоп, так как период его полураспада значительно меньший. Значения объемной активности радона в поверхностных водах малых рек г. Усть-Камеогорска и его окрестностей колеблются от 0 до 856 Бк/л (рис. 46). При этом среднее значение фонового уровня данной величины при применении непараметрических статистических методов оценивается на уровне 3 Бк/л. Граница между первым аномальным значением и фоновым уровнем определяется в 33 Бк/л.

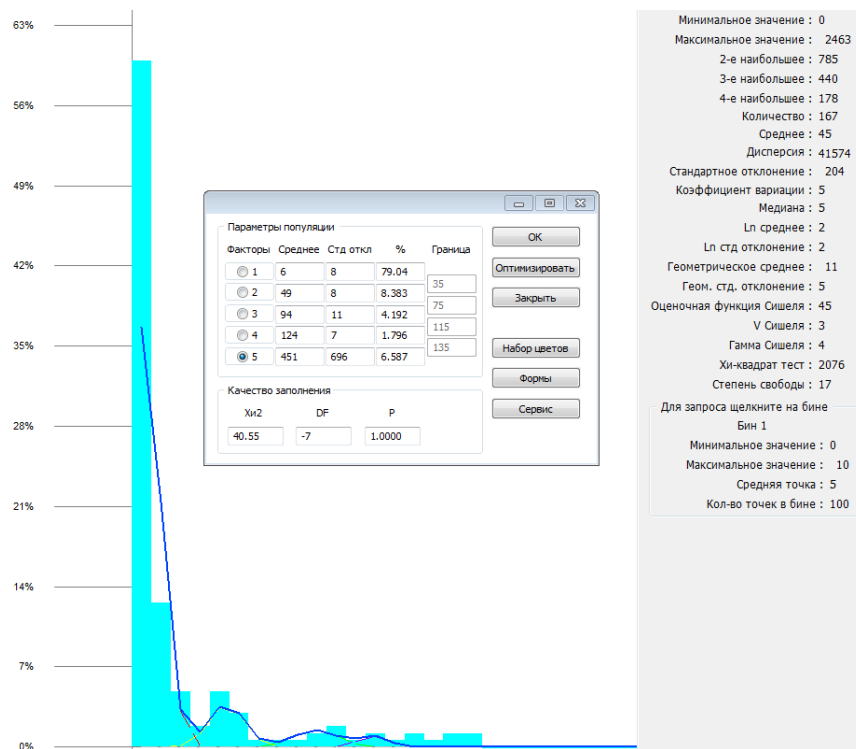


Рис. 46 - Особенности статистического распределения данных по содержанию радона в поверхностных водах малых рек г. Усть-Каменогорска и его окрестностей

В большинстве случаев аномалии торона пространственно совпадают с радоновыми аномалиями. Однако отмечаются и различия. Не все радоновые аномалии сопровождаются повышенной объемной активностью торона. Тем не менее, в пределах северных окрестностей г. Усть-Каменогоска, в ареале развития тектонических клиньев гранито-гнейсов протерозойского возраста в поверхностных водах отмечаются аномальные значения объемной активности торона. Особенно это характерно для зон тектонических контактов протерозойских и палеозойских пород. Вторая группа аномалий приурочена к водотокам трассирующим Калба-Нарымский глубинный разлом. Именно для этих вод, как и для радона, устанавливаются наиболее высокие уровни удельной активности торона до 856 Бк/л.

Высокие уровни объемной активности торона, до 338 Бк/л, характерны и для поверхностных водотоков, дренирующих гранито-гнейсы Чечекского массива, особенно в районе его эдоконтактовых зон подверженных тектонической раздробленности пород. В пределах других участков развития гранито-гнейсов в поверхностных водах также отмечаются повышенные значения объемной активности торона, но аномальных значений они не достигают (рис. 47).

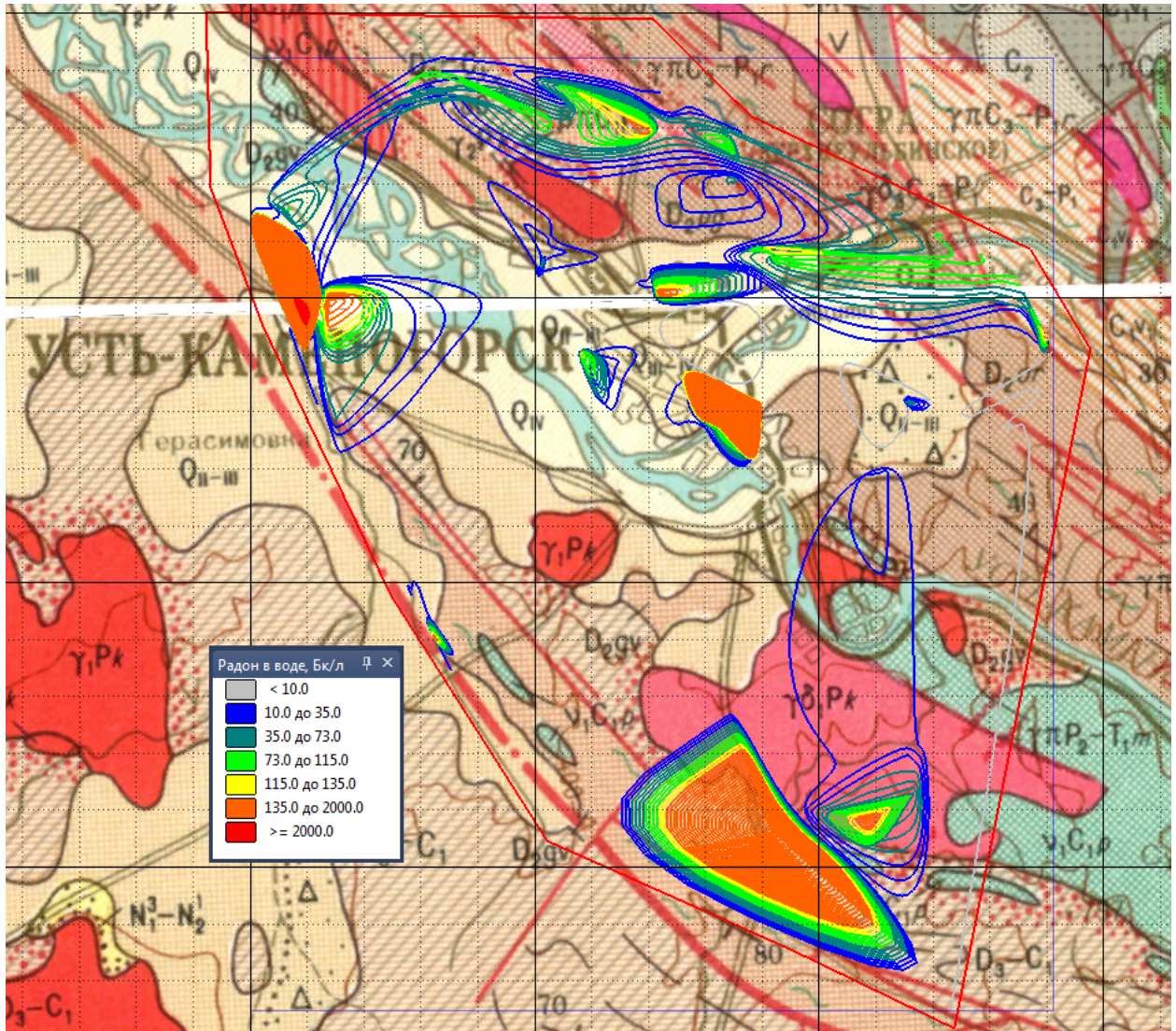


Рис. 47 - Особенности проявления аномальных значений объемной активности радона в поверхностных водах малых рек г. Усть-Каменогорска и ее взаимосвязь их с геологической средой.

Спорадическое небольшое увеличение объемной активности торона, не превышающее фоновых уровней, отмечается и в поверхностных водах малых водотоков вокруг промышленной зоны г. Усть-Каменогорска. Вероятнее всего оно обусловлено влиянием техногенных объектов.

Таким образом, опираясь на данные исследований по объемной активности торона и радона в поверхностных водоемах малых рек, протекающих в пределах г. Усть-Каменогорска и его окрестностей удалось выявить ряд участков с аномальными значениями данных величин. Анализируя особенности геологического строения изученной территории и характер пространственного распределения выявленных аномалий можно сделать заключение, что основной причиной радон-тороновых эманация в большинстве случаев являются зоны региональных глубинных тектонических разломов, разделяющих древние и более молодые блоки земной коры, а также различные террейны, в частности Калаба-Нарымский

и тектонические блоки Иртыш-Фуянской зоны.

Именно с этими тектоническими структурами связаны наиболее контрастные аномалии. В то же время данное утверждение требует дополнительных исследований и подтверждений, что планируется выполнить в ходе последующих исследований.

Вторая группа аномалий, как правило менее контрастная, приурочена к промышленным объектам и по всей видимости имеет техногенное происхождение. Она обусловлена локализацией в пределах территории города радиоактивных отходов, загрязняющих почвы, глинистые и галечные отложения в пределах пойм рек Ульба и Иртыш (рис. 48).

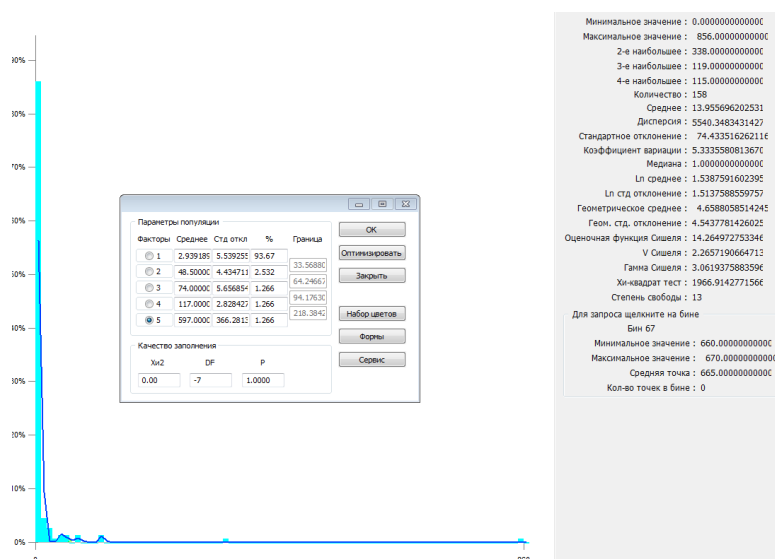


Рис. 48 - Особенности статистического распределения данных по содержанию торона в поверхностных водах малых рек г. Усть-Каменогорска и его окрестностей

Выделенные на основании рекогносцировочных радиогидрохимических исследований масштаба 1:50000 аномальные участки требуют дальнейших мониторинговых и детализационных исследований. Первые должны определить сезонные изменения эманациях родона и торона и степени воздействия на здоровье населения и состояние радиационной безопасности территорий. Вторые – детализировать особенности проявления выявленных аномалий, выяснить их источник и оконтурить участки, ограничивающие хозяйственную деятельность в соответствии с нормами радиационной безопасности.

Региональные радиогидрохимические исследования в Украине. Массовое обследование подземных вод г. Киева (250 измерений), которое используется для коммунального водоснабжения, показало что максимальная ОА радона а артезианских скважинах составляет 34 Бк/дм³, минимальная – 1 Бк/дм³. Для сеноманского водоносного горизонта от 4,9 до 24,6 (среднее 10,7), для байосского от 2,7 до 11,8 (среднее 6,0); родники

и минерализованные источники – 7, колодцы - 5, поверхностные воды – 2 (табл. 21, рис. 49).

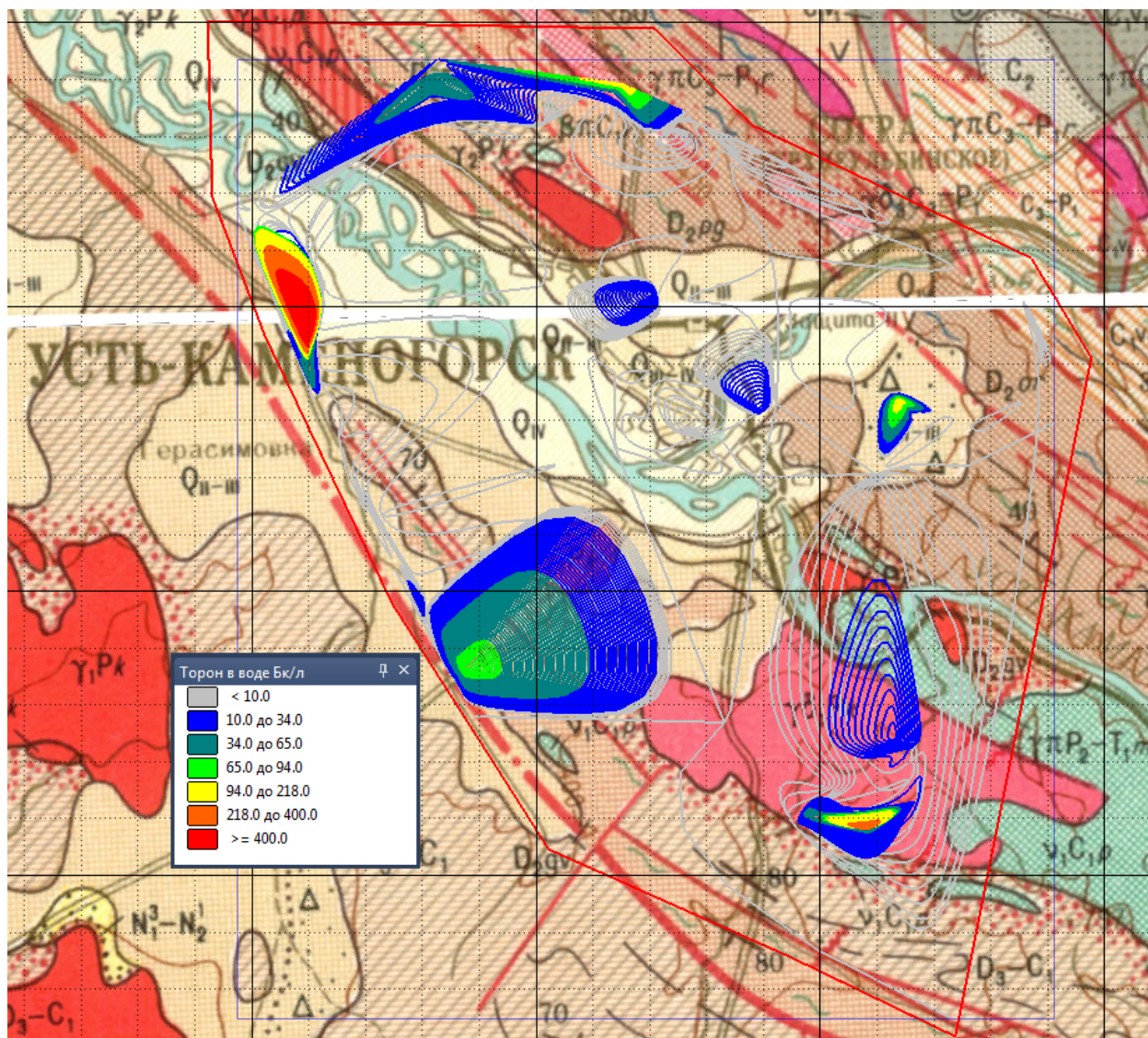


Рис. 49 - Особенности проявления аномальных значений объемной активности торона в поверхностных водах малых рек г. Усть-Каменогорска и ее взаимосвязь их с геологической средой.

Другое исследование [8-10] в несколько сотен измерений показало, что по содержанию естественных радионуклидов (ЕРН) наиболее стерильными являются вод четвертичного, эоценового и байосского водоносных комплексов. Относительно повышенное содержание концентрации радона в водах родников объясняются наличием в полтавских отложениях линз монацитовых песков, содержащих повышенные содержания U (Ra) и Th. Содержание в них ЕРН достигает: Th – 830, Ra – 25, ^{235}U – 1 и К-40 – 120 Бк/кг с высоким K_9 20-30% [54].

Средние содержания четвертичные (колодцы) – 4,32; четвертичный и палеогеновый (источники) – 45,54; палеогеновый – 5,62; верхнемеловой - 16,1; среднеюрский - 7,02; архейско-протерозойский – 1611.

Табл. 21 – Содержание ^{222}Rn в воде из источников хозяйственного и рекреационного водопользования на территории Ирпень-Буча-Ворзельской рекреационной зоны [40-42]

| Характеристика источников водоснабжения | Геологический возраст | Глубина, м | Концентрация радона в местах отбора проб, $^{222}\text{Rn}_{\text{max}}$, Бк/л | | | | |
|---|-----------------------|------------|---|---------------|----------|----------|-------------|
| | | | пгт Коцюбинское | пгт Гостомель | г.Ирпень | пгт Буча | пгт Ворзель |
| Озеро | Q | 0 | <5 | | | | |
| Озеро | Q | 0,2 | <5 | | | | |
| Озеро | Q | 2,8 | <5 | | | | |
| Родник | Q | 0 | | 6 | | | |
| Родник | Q | 0 | | 5 | | | |
| Родник | Q | 0 | | <5 | | | |
| Родник | Q | 0 | | | 5 | | |
| Колодец | Q | 4 | | | 31 | | |
| Колодец | Q | 4 | | | 29 | | |
| Колодец | Q | 5 | | | | 8 | |
| Колодец | Q | 5 | | | | 26 | |
| Колодец | Q | 5 | | | | 30 | |
| Колодец | Q | 5 | | | | 33 | |
| Артезианская скважина | P | 56 | | | | <5 | |
| Артезианская скважина | P | 56 | | | | <5 | |
| Артезианская скважина | P | 60 | | | | | <5 |
| Артезианская скважина | P | 75 | | | | <5 | |
| Артезианская скважина | P | 77 | | | | <5 | |
| Артезианская скважина | P | 79 | | | | <5 | |
| Артезианская скважина | P | 82 | | | | | <5 |
| Артезианская скважина | P | 86 | | | | <5 | |
| Артезианская скважина | P | 83 | | | | | <5 |
| Артезианская скважина | P | 85 | | | | | <5 |
| Артезианская скважина | P | 87 | | | | <5 | |
| Артезианская скважина | P | 89 | | | <5 | | |
| Артезианская скважина | P | 90 | | | | <5 | |
| Артезианская скважина | P | 92 | | | <5 | | |
| Артезианская скважина | P | 94 | | | <5 | | |
| Артезианская скважина | K | 120 | <5 | | | | |
| Артезианская скважина | K | 125 | <5 | | | | |

| Характеристика источников водоснабжения | Геологический возраст | Глубина, м | Концентрация радона в местах отбора проб, $^{222}\text{Rn}_{\text{max}}$, Бк/л | | | | |
|---|-----------------------|------------|---|---------------|----------|----------|-------------|
| | | | пгт Коцюбинское | пгт Гостомель | г.Ирпень | пгт Буча | пгт Ворзель |
| Артезианская скважина | К | 122 | 9 | | | | |
| Артезианская скважина | К | 122 | 5 | | | | |
| Артезианская скважина | К | 124 | | | | | 16 |
| Артезианская скважина | К | 135 | 6 | | | | |
| Артезианская скважина | К | 137 | 8 | | | | |
| Артезианская скважина | К | 142 | 26 | | | | |
| Артезианская скважина | К | 142 | 7 | | | | |
| Артезианская скважина | К | 160 | | | | | <5 |
| Артезианская скважина | К | 160 | | | | | <5 |
| Артезианская скважина | Ж | | <5 | | | | |
| Артезианская скважина | Ж | | 8 | | | | |

Радон в питьевой воде. В многих странах, некоторые дома получают питьевую воду с подземных источников (ручьи, колодцы, скважины). Вследствие их волатильности, радоновое загрязнение встречается преимущественно в подземных, а не поверхностных питьевых водах (рис. 50). Подземные воды часто движутся через породы, содержащие природный уран, и поглощают испускаемый ими радон. Поэтому, воды со скважин имеют более высокое содержание радона нежели поверхностные воды, такие как реки, озера.

Из-за разнообразия условий радононакопления в водах в разных странах приняты различные величины допустимых уровней воздействий радона для питьевых вод. В Финляндии и Швеции допустимый уровень воздействия радона (в Бк/дм³) составляет 300, Ирландии – 200, РФ – 120, Украине – 100, США – 11,1 (или 300 пКи/дм³). Нормируется также и содержание радонуклидов в питьевой воде. В природной смеси радионуклидов урана, радия-226, радия-228, их суммарная активность не должна превышать 1 Бк/дм³ (USEPA).

Предварительная оценка возможности использования воды для питьевых целей дается по показателю удельной суммарной альфа- и бета-активностей. Если уровень α -активности воды не превышает 100 (в Бк/дм³), а β -активности – 1,0 (в Бк/дм³), то считается что доза, полученная населением, потребляющим эту воду, не превысит установленную НРБУ-97 предельную дозу – 0,1 мЗв/год [27].

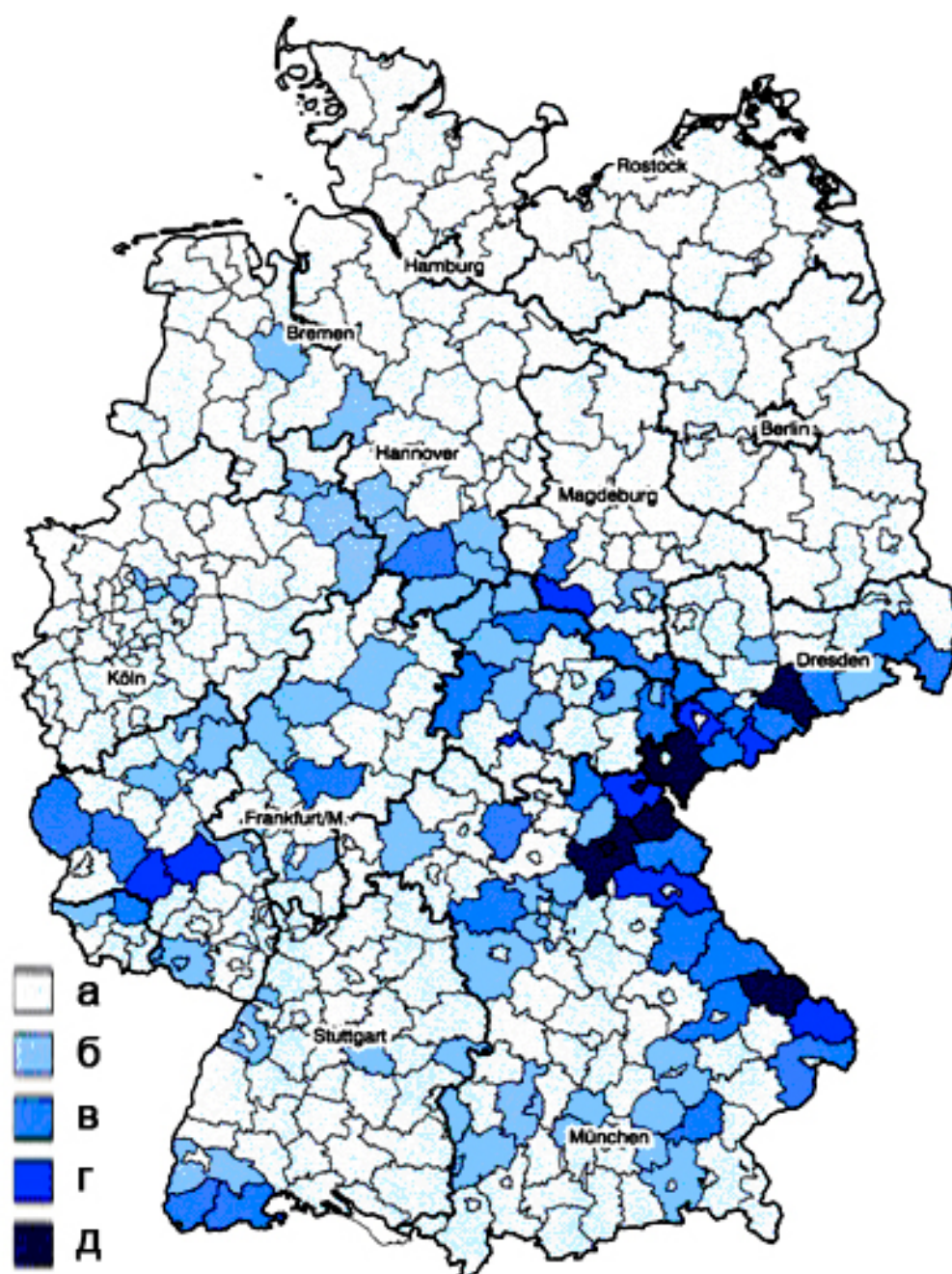


Рис. 50 – Радон в питьевой воде Германии
Концентрация радона в Бк/л: а) <10, б) 10 – 20, в) 20 – 50, г) 50 – 100, д) >100
(Fachgebiet AS 2.2 – October 1999)

Радон в природном газе. Объемная активность радона в природном горючем газе варьирует в широких пределах и может достигать 50 кБк/м³ [20]. Сжигание природного газа в бытовых целях может приводить к увеличению ЭРОА радона в помещениях. Перечисленные выше источники радона в эталонном помещении (площадью 100 м², объемом 250 м³) могут обеспечивать среднюю скорость поступления радона порядка 50 Бк·час/м³ [27].

Радон из строительных материалов. В дополнение к почвенному и водному источникам радона в воздухе помещений, существенным фактором повышения уровня радона могут выступать строительные материалы (табл. 22).

Величина эффективной удельной активности естественных радионуклидов $A_{эфф}$ в значительной степени определяет гамма-фон в помещении и формирует дозу внешнего облучения человека. Наибольшую величину $A_{эфф}$ имеет глинистое сырье и керамические материалы.

Табл.22 – Содержание радия-226 в строительных материалах

| Материал | | Ra-226, Бк/кг |
|--------------------------------------|----------------|---------------|
| Дерево | | 1,11 |
| Гипс, известь | | 30-40 |
| Портландцемент | | 101 |
| Бетон | | 15,9-61,05 |
| Керамзит | | 168 |
| Кирпич керам. | | 40,7-171 |
| Кирпич силик. | | 59,7 |
| Облицовочная доска | Природный гипс | 4,07-9,99 |
| | Фосфогипс | 27,01 |
| Изолирующий материал (стекловолокно) | | 12,95-40,7 |

Согласно НРБУ-97, в строительных материалах 1-го класса, используемых во всех вновь строящихся жилых и общественных зданиях, эффективная удельная активность ЕРН $A_{эфф}$ не должна превышать 370 Бк/кг и определяется как взвешенная сумма удельных активностей радия-226, тория-232 и калия. Взвешивающие коэффициенты соответственно 1; 1,31 и 0,085.

Классы радиационной безопасности строительных материалов (по НРБУ-97)

Класс 1: не превышает 370 Бк/кг. Пригодность: все виды строительства.

Класс 2: 370-740 Бк/кг (дающее 40 мкР/час). Пригодность: для промышленного и дорожного строительства в пределах населенных пунктов и зон перспективной застройки, наружная облицовка зданий.

Класс 3: от 740 до 1350 (до 73 мкР/час). Пригодность: для промышленного и дорожного строительства вне населенных пунктов.

Класс 4: больше 13500 (больше 73 мкР/час).

Все остальные классы стройматериалов, в которых концентрация ЕРН превышает указанные нормы, нельзя применять в строительстве.

При содержании радия-226 в строительных конструкциях порядка 100 Бк/кг ЭРОА радона в помещениях увеличивается в среднем на 14 Бк/м³, что соответствует дополнительной дозе облучения около 1 мЗв/год.

Задача Вычисление величины эффективной удельной активности $A_{эфф}$ по нормативам Украины, Польши, Австрии.

По НРБУ-97:

$$A_{эфф} = A_{Ra} + 1.31A_{Th} + 0.085A_K, \quad (5.3)$$

где A_{Ra}, A_{Th}, A_K - удельные активности радия, тория и калия, Бк/кг.

Польский нормативу [7]:

$F_1 = 0.00027S_k + 0.0027S_{Ra} + 0.0043S_{Th}$ (ограничивает внешнее облучение гамма-излучением)

$F_2 = S_{Ra}$, (ограничивает концентрацию радия в материале, которая определяет уровень концентрации свободного радона в воздухе помещений)

где S_k, S_{Ra}, S_{Th} - соответственно концентрации калия-40, радия и тория в данном материале.

Материал отвечает требованиям если квалификационные категории удовлетворяют: $F_1 = 1, F_2 = 5nKu/\varepsilon$.

По австрийскому нормативу [107]: критерием радиоактивной безопасности материалов является условие 1:

$$\frac{C_k}{9620} + \frac{C_{Ra}(1 + 0.1\varepsilon\rho d)}{740} + \frac{C_{Th}}{520} \leq 1, \quad (5.4)$$

где C_k, C_{Ra}, C_{Th} - концентрация соответствующего радиоизотопа (калий, радий, торий), Бк/кг; ε - безразмерная величина, меньше 1; d - толщина стены, м; ρ - плотность стены, кг/м³.

Выражение $\frac{C_{Ra}(1 + 0.1\varepsilon\rho d)}{740}$ учитывает излучение по радону, источником которого является содержащийся в строительных материалах радий.

Реферативные данные: ρ - 2000 кг/м³, ε - 0,1, d - 0,3 м.

При случае не выполнения условия 1, проверяют условие 2

$$\frac{\rho d}{250} \left(\frac{C_k}{9620} + \frac{C_{Ra}}{740(1 + 25\varepsilon)} + \frac{C_{Th}}{520} \right) \leq 1. \quad (5.5)$$

Коэффициент равновесия радона и ДПР. Дочерние продукты радона и торона непрерывно образуются в виде положительно заряженных атомов, а поскольку это изотопы тяжелых металлов они быстро оседают на поверхностях интерьера или аэрозольных частиц. Накопление радона в помещениях и связанный с ним дисбаланс

положительных и отрицательных ионов (неблагоприятный аэроионный режим) может также негативно воздействовать на здоровье людей. Образовавшиеся радиоактивные аэрозоли удаляются вследствие их распада, за счет вентиляции и сухого выпадения и вымывания.

В воздухе ДПР они могут находиться в двух различных формах.

а) В виде элементарных ионов или отдельных атомов. В этом состоянии продукты распада радона обладают большим коэффициентом диффузии, равным 0,5 см²/с, и подвижностью при положительном элементарном заряде, равной 2,2 см²/с на 1 В, что соответствует частицам с радиусом равным удвоенному радиусу молекул азота или кислорода, на долю которых приходится основная масса воздуха. Первая форма крайне неустойчива из-за большой способности атомов и ионов к адсорбции, однако потеря ее постоянно восполняется в результате распада радона, поступающего в помещения.

б) В виде атомов, осевших на аэрозольные частицы (ядра конденсации), находящиеся в воздухе. Коэффициент диффузии в зависимости от размеров частиц меняется в пределах $2 \cdot 10^4$ - $3 \cdot 10^6$ см²/с.

Вследствие электростатического заряда ДПР могут оседать на поверхности или пылевых частицах. В то время как газообразный радон не имеет такой возможности. Электростатическое осаждение ДПР удаляет их из воздуха, в результате чего коэффициент равновесия становится меньшим 1. Коэффициент равновесия также может снижаться за счет циркуляции воздуха или фильтрации воздуха через фильтры. Частицы пыли в воздухе, в том числе аэрозоли сигаретного дыма - объект осаждения ДПР. В высоких концентрациях в воздухе ДПР способствуют в значительной степени повышению риска для здоровья человека. Найденный в эпидемиологических исследованиях коэффициент равновесия составляет 0,4.

Особенности распределения активностных концентраций радона внутри помещений. Следует отметить, что *внутренние уровни радона* (содержание радона в воздухе помещений) не связаны простой связью с геологическими факторами. Соотношение зависит от многих причин, в том числе степени трещиноватости массива, путями и механизмом перемещения. Мобильность радона через почву может изменяться в пределах 10^6 раз в зависимости от пористости.

Проницаемость горных пород в настоящее время признается в качестве ключевого фактора, влияющего на наличие радона на поверхности, даже в условиях низкой концентрации урана (например, в таких породах как известняк). Уровни радона значительно различаются в разных регионах страны из-за геологических факторов, наличием рудников и хвостохранилищ, а также уровней радия и радона в системах водоснабжения.

Радон может попасть в здание множеством способов и только одним покинуть помещение – с вытяжной тягой воздуха. Содержание радона в воздухе помещений значительно варьирует в зависимости от типа здания, его конструктивных особенностей [154, 159].

Дома с подвалами или полуподвалами более восприимчивы к проблемам радона, чем дома, построенные с подполом или с бетонной плитой на грунте. Причина вероятно в том, что эти дома имеют большую площадь контакта с землей и конструкция имеет больше отверстий с грунтом, чем бетонная плита на поверхности.

Уровень концентрации радона в помещении вообще будет самым высоким в подвале или на первом этаже, так как основным источником является приток из почвы. Эффект подсосывания радона в воздух помещений усиливается, если окна и двери хорошо запечатаны и дом вентилируется системой вентилятора. Концентрации радона на втором этаже, как правило, два раза ниже чем на первом. Концентрация радона на этажах выше первого уже существенного влияния не имеет.

Высокое подпочвенное давление, по отношению к пониженному давлению в домах, заставляет радон перемещаться в здание. Наиболее эта тенденция выражена в зимнее время, когда горячий низкоплотный воздух вытекает из дымовых труб, заменяясь холодным радонсодержащим воздухом из окружающей среды. Когда земля промерзает, проницаемость почвы уменьшается, канал наибольшего доступа радона в жилище перемещается под дом, грунт теплее.

Привычки жителей домов тоже влияют на режим изменений радона в воздухе помещений. Опытные измерения показывают, что уровень концентрации радона в воздухе может увеличиваться три-пятикратно при изменении режима проветривания помещений.

Региональные измерения радона в воздухе помещений жилого и социального назначения г.Усть-Каменогорска (Республик Казахстан). Рекогносцировочные радиогидрохимические исследования территории г. Усть-

Каменогорска и его окрестностей масштаба 1:50 000 показали, что данная территория характеризуется интенсивными эманациями радона и торона, обусловленными как геологическими особенностями данного региона, так и техногенными факторами. Это позволило предварительно отнести изученную территорию к потенциально радоноопасной и как результат поставить комплекс детальных эманационных исследований по оценке радоновых рисков. Исходя из физико-химических особенностей данных газов, важными наблюдениями для сбора первичной информации являются измерение эманаций радона и торона в подвальных помещениях зданий и сооружений, особенно в пределах радоно- или тороногенерирующих геологических структур и техногенных образований.

Эманационные исследования на застроенных участках и участках будущей застройки преимущественно выполняется в виде профильно-площадной съемки, технология измерений – аналогичная эманационной съемке, что выполняется при решении геологических задач. Оценка потенциальной радоноопасности территории осуществляется по комплексу геологических и геофизических признаков. К геологическим признакам относятся: наличие определенных петрографических типов пород, разрывных нарушений, присутствие радона в подземных и поверхностных водах и выходы радоновых источников на поверхность.

Геофизические признаки включают: высокую удельную активность радия в породах выполняющими геологический разрез; повышенные содержания урана и тория в почвах, высокие уровни объемной активности ОА радона в почвенном воздухе, повышенную сейсмическую активность территории, высокую эквивалентную равновесную объемную активность (ЭРОА) радона в зданиях и сооружениях, эксплуатируемых на исследуемой территории и в прилегающей зоне. Наличие данных о зарегистрированных значениях эквивалентной равновесной объемной активности радона, что превышают 100 Бк/м³, в эксплуатируемых в исследуемом районе зданиях, служит основанием для классификации территории как потенциально радоноопасные.

Для проведения эманационных исследований в подвальных помещениях зданий и сооружений в Усть-Каменогорске использовался радонметр «Альфарад Плюс». В ходе измерений в журнале наблюдений регистрировались следующие величины:

1. № п/п
2. Дата измерений
3. Время измерений
4. тематика исследований
5. № точки по GPS
6. Географические координаты X
7. Географические координаты Y
8. Абсолютная отметка на уровне моря
9. Особенности произведения замера
10. Экспозиционная мощность дозы, мкР\час
11. ОА, Бк·м-3 (Бк·л-1)

12. Погрешность
13. ОАинт., Бк·м-3 (Бк·л-1)
14. ЭРОА (Rn)
15. Погрешность
16. ЭРОА (Tn)
17. Погрешность
18. ЭРОА=(ЭРОА_{Ра} + 4,6* ЭРОА_{Th})
19. Погрешность
20. Концентрация RaA, Ca
21. Концентрация RaC, Cc
22. Концентрация RaB, Cb
23. Коэффициент равновесия FД

Такой подход позволит создать основу для дальнейшего построения геоинформационной системы и моделирования на ее основе радоновых рисков территории г.Усть-Кменогорска и его окрестностей.

Опираясь на значительный международный опыт радоновых программ выполненных за рубежом, в пределах г. Усть-Каменогорска были проведены исследования по определению эквивалентной равновесной объемной активности дочерних продуктов радона и торона. Для отработки методики в качестве эталона была выбрана жилая зона Ульбинского части г. Усть-Каменогорска, которая непосредственно примыкает к промзоне, в том числе и к предприятиям использующим радиоактивные материалы в своем производстве. Более того, именно на данной территории размещаются наиболее крупные площадные пятна с историческими радиоактивными отходами, а также проявлено ряд аномалий, выявленных по данным рекогносцировочных радиогидрохимических исследований масштаба 1:50000.

В целом максимальные значения ЭРОА(Rn) в пределах изученной территории достигают 736 Бк/м³ (рисунок). Фоновые значения данной величины оцениваются в 57 Бк/м³, что значительно ниже предельных нормативных уровней. Аномальные уровни начинаются выделяться со значений ЭРОА(Rn) 127 Бк/м³.

Измерения эквивалентной равновесной объемной активности дочерних продуктов радона (рис. 51) на изученной территории позволило локализовать, по крайней мере три крупных аномальных участка. Это район кампуса Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д.Серикбаева (наиболее крупная и интенсивная аномалия), район улиц Ворошилова, Белинского и Образцова, а также в районе микрорайона Тополевая роща. Именно в домах на этих участках значения ЭРОА(Rn) превышает 200 Бк/м³.

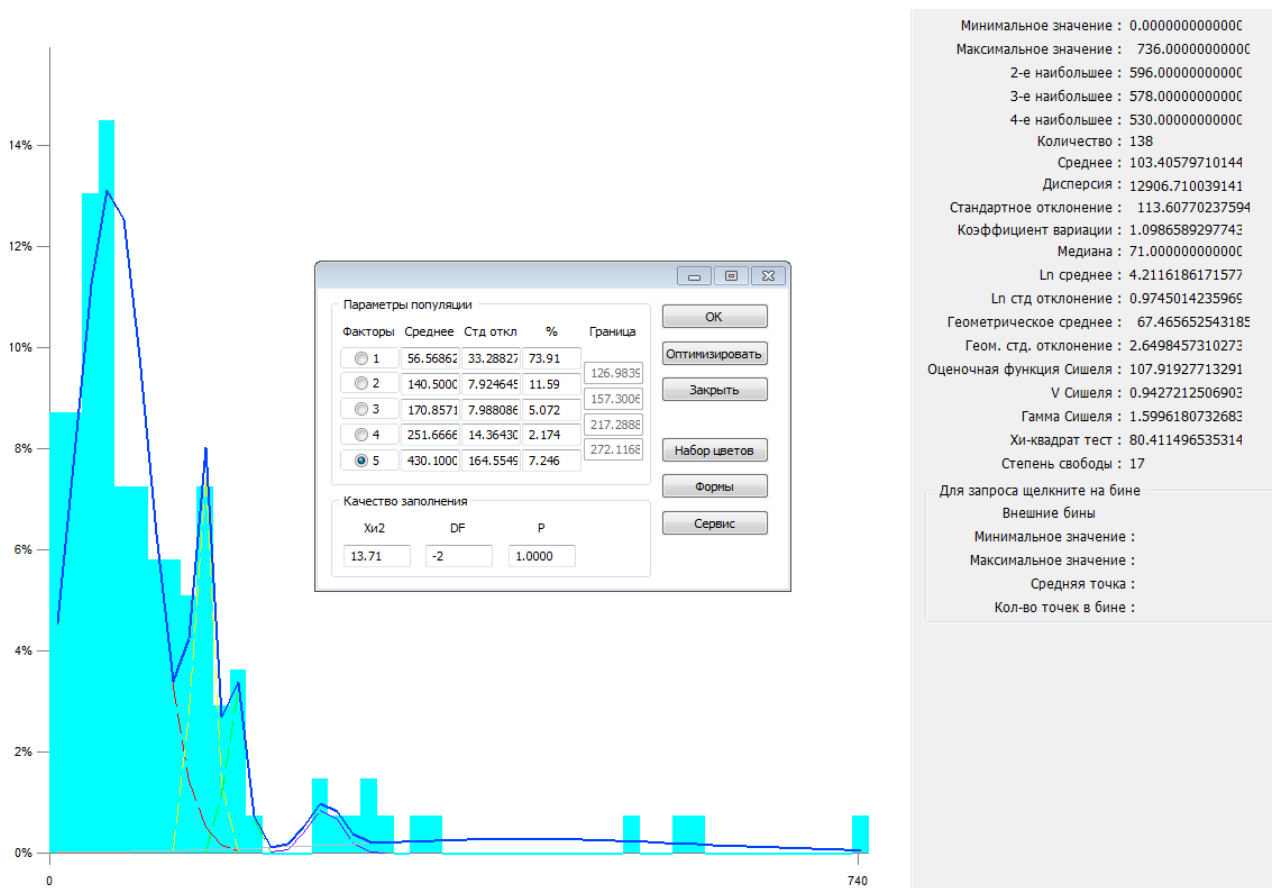


Рис. 51 - Особенности статистического распределения данных по содержанию эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) дочерних продуктов радона в помещениях жилого и социального назначения Ульбинской части г.Усть-Каменогорска

Для величины ЭРОА T_n фоновые уровни на изученной территории оцениваются в $2,1 \text{ Бк/м}^3$ (рис. 52). Наиболее низкие аномальные уровни определяются как 17 Бк/м^3 .

Слабые аномалии, значения ЭРОА T_n установлены в районе кампуса Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева, на пересечении улиц Астана и Дзержинского, дачного массива между улицами Пограничная и Целинная, по р. Комендантке, выше проспекта Независимости. Аномалии с более высокими значениями, но не превышающими нормативные уровни, также отмечаются вдоль улиц Ворошилова, в районе Тополевой рощи и по улице Амурская. С максимальными значениями ЭРОА T_n выделяется аномальный участок лишь в районе пересечения улицы Ворошилова с улицами Белинского и Образцова (рис. 53).

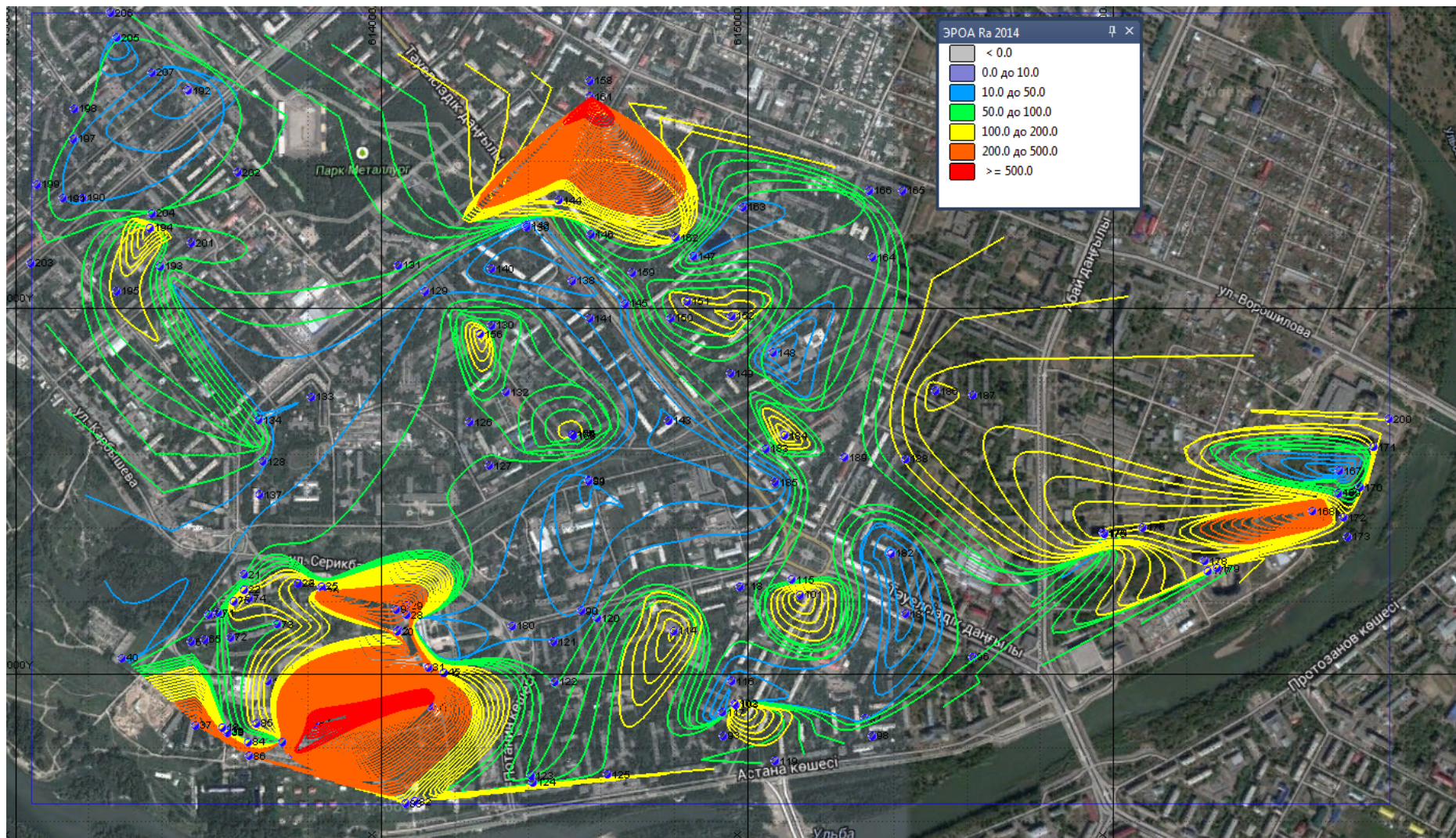


Рис. 52 - Особенности проявления аномальных значений эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) дочерних продуктов радона в помещениях жилого и социального назначения Ульбинской части г.Усть-Каменогорска

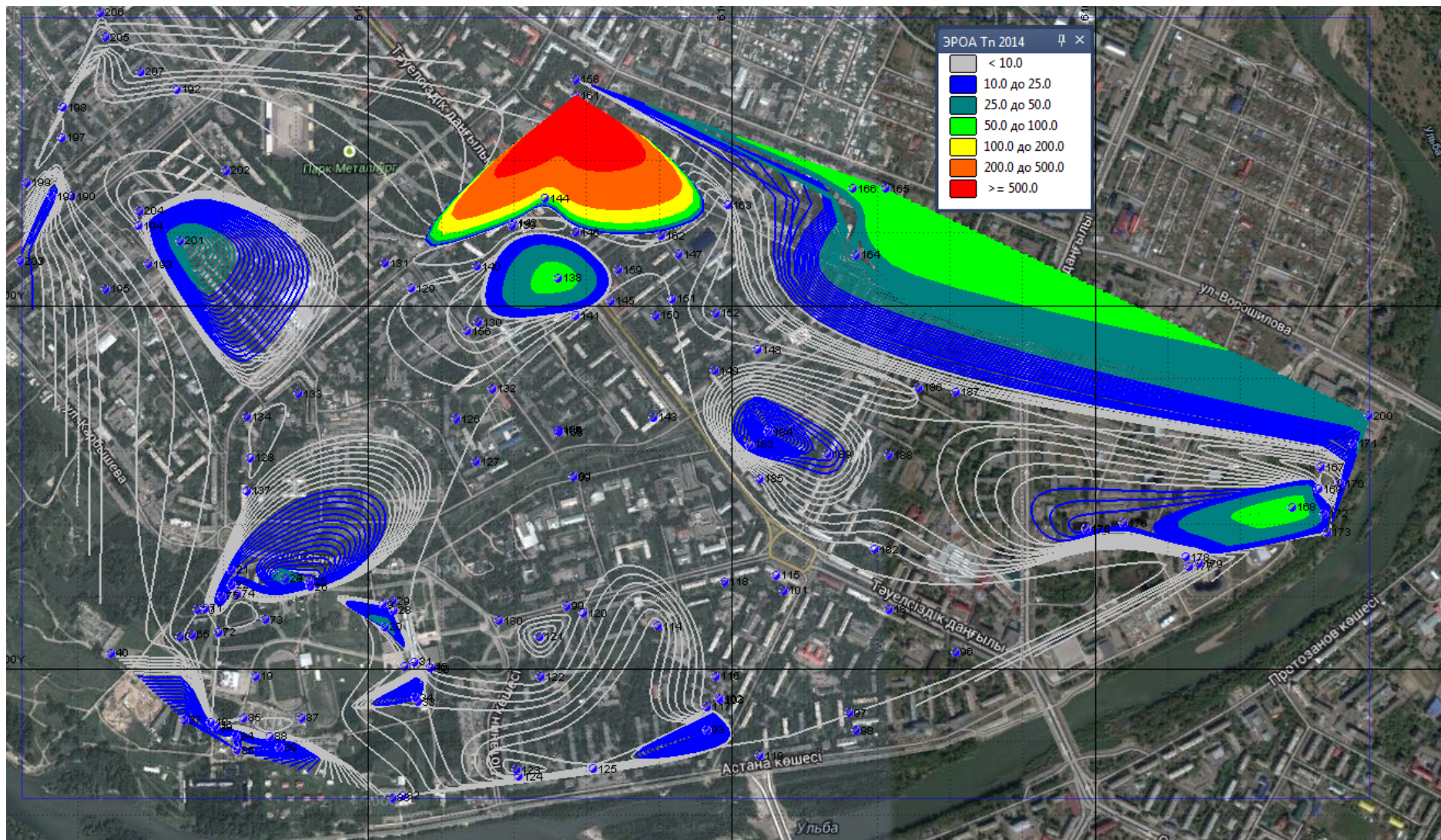
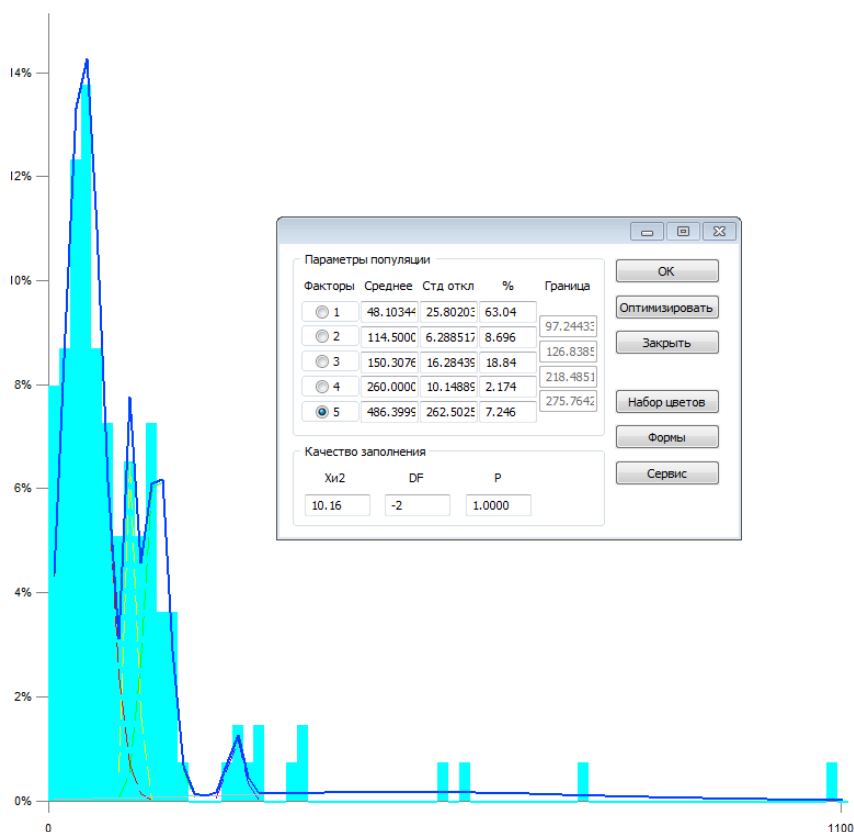


Рис. 54 - Особенности проявления аномальных значений эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) дочерних продуктов торона в помещениях жилого и социального назначения Ульбинской части г.Усть-Каменогорска



Минимальное значение : 0.0000000000000000
 Максимальное значение : 1092.0000000000000
 2-е наибольшее : 745.0000000000000
 3-е наибольшее : 578.0000000000000
 4-е наибольшее : 541.0000000000000
 Количество : 138
 Среднее : 109.5000000000000
 Дисперсия : 18574.645985401
 Стандартное отклонение : 136.28883294460
 Коэффициент вариации : 1.2446468762064
 Медиана : 72.0000000000000
 Ln среднее : 4.2445692855370
 Ln std отклонение : 0.9818736438485
 Геометрическое среднее : 69.725721798574
 Геом. std. отклонение : 2.6694531637408
 Оценочная функция Шиселя : 112.3303788631E
 V Шиселя : 0.9570388024662
 Гамма Шиселя : 1.611032140874E
 Хи-квадрат тест : 107.6221395552E
 Степень свободы : 19
 Для запроса щелкните на бине
 Внешние бины
 Минимальное значение :
 Максимальное значение :
 Средняя точка :
 Кол-во точек в бине :

Рис. 55 - Особенности статистического распределения данных по содержанию эквивалентной равновесной объемной активности дочерних продуктов радона и торона в воздухе помещений ЭРОARn+4,6×ЭРОATh в помещениях жилого и социального назначения Ульбинской части г. Усть-Каменогорска

Практически все вышеназванные территории лишь по параметру эквивалентной равновесной объемной активности дочерних продуктов радона и торона будут относиться к территориям с повышенным уровнем радонового риска или потенциально радоноопасные, а в пределах аномалий со значениями более 200 Бк/м³ – к высокорадоновым или радоноопасным участкам. В зданиях, расположенных на данных территориях необходимо разворачивать комплекс превентивных мер, направленных на снижение концентраций радона и торона. В первую очередь наиболее простым подходом может выступать проветривание и вентиляция жилых и общественных помещений. Подобные походы изучались в ходе настоящих исследований в подвальных помещениях главного учебного корпуса Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева. В частности, в одном из подвальных помещений были зафиксированы значения ЭРОARn + 4,6 × ЭРОATh на уровне 745 Бк/м³. Использование в течение одного часа приточно-вытяжной вентиляции в данном помещении снизило данные показатели ниже 100 Бк/м³.

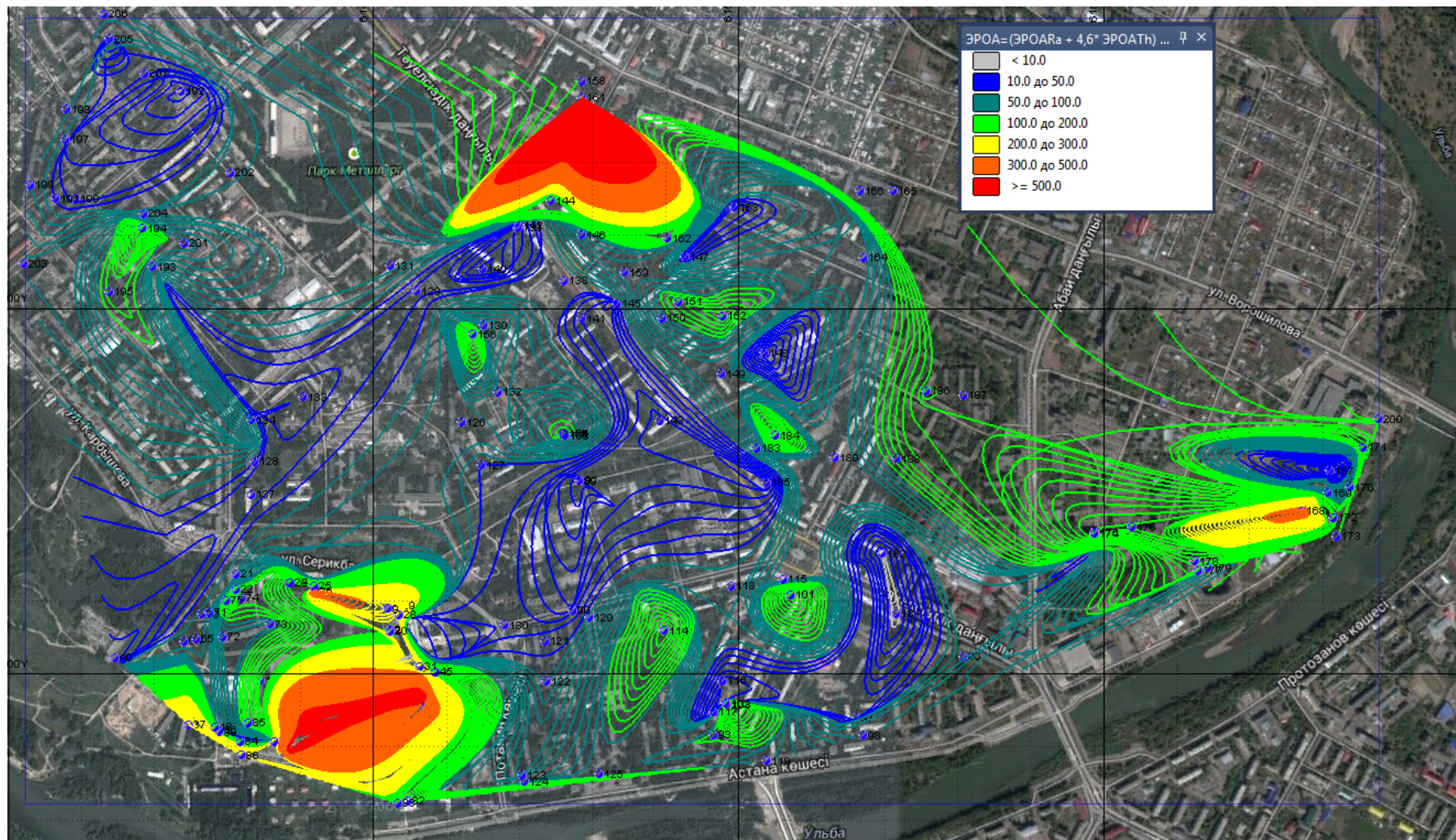


Рис 56 - Особенности проявления аномальных значений эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) дочерних продуктов радона и торона в воздухе помещений ЭРОА_п + 4,6 × ЭРОА_т в помещениях жилого и социального назначения Ульбинской части г.Усть-Каменогорска

Задача 1. Особенности формирования радиационной обстановки в зданиях. Из-за отсутствия достаточного числа экспериментальных данных прогнозирование уровней ЭРОА радона в жилищах проводят обычно на основании теоретических расчетов для так называемого "эталонного дома" [16].

Пример. Принимается допущение, что помещение расположено на 1 этаже и имеет площадь S (м²), высоту H (м) при значениях времени одного воздухообмена T (с), интенсивности выделения радона с поверхности грунта под зданием σ (мБк/(с·м²)) и при отсутствии специальной радонозащиты здания. Модельные расчеты баланса скорости поступления и выноса радона с некоторыми упрощениями можно представить в виде такой зависимости:

$$\frac{\sigma S}{1000} + 4 \frac{\sigma_{CT} S}{1000} + C_H \frac{HS}{T} = C_{II} \frac{HS}{T}, \quad (5.6)$$

где σ_{CT} - интенсивность выделения радона с единицы поверхности строительных конструкций, мБк/(с·м²); C_{II} - средний уровень ЭРОА радона в помещении, Бк/м³; C_H - ОА радона в наружном воздухе, Бк/м³.

$$\text{Отсюда } C_{II} = C_H + \frac{(\sigma + 4\sigma_{CT})T}{1000H}.$$

Вследствие эманирования стройматериалов ЭРОА радона в помещении увеличивается в среднем на 7 Бк/м³. При этом величина ППР с единицы поверхности строительных конструкций при типичных для них значений удельной активности радия-226 20 Бк/кг, коэффициента эманирования радона 20 % и коэффициента диффузии радона в стройматериалах $2 \cdot 10^{-5}$ (с·м²) равна 0,6 мБк/(с·м²).

Расчетное значение минимальной кратности воздухообмена в помещениях во вновь строящихся зданиях жилого назначения согласно строительных норм составляет 0,5 ч⁻¹. При значении $T=7200$ с, высоты $H=2,8$ м и при $C_H=9$ Бк/м³ и $\sigma_{CT} = 0,6$ мБк/(с·м²) имеем: $C_{II}=15+2,6\sigma$

При этом предельно допустимому значению ЭРОА радона (250 Бк/м³ при значении фактора равновесия между радоном и его дочерними продуктами 0,4) соответствует значение ППР около 90 мБк/(с·м²). При учете вклада в суммарную дозу за счет дочерних продуктов торона (10%) значение ЭРОА радона составит 225 Бк/м³. При этом значение ППР составит около 80 мБк/(с·м²).

Обычно интенсивность воздухообмена в помещениях производственного назначения превышает 1,5 ч⁻¹. При этом допустимому значению ППР 250 мБк/(с·м²) [26] будет соответствовать ЭРОА радона, равная 100 Бк/м³.

Задача 2. Особенности формирования мощности экспозиционной дозы в зданиях. Другим (кроме ЭРОА радона) параметром, характеризующим радиационную обстановку в здании, является мощность эффективной дозы гамма-излучения (МЭД, мкЗв/ч). Среднее значение МЭД в помещениях связано с величиной удельной активности природных радионуклидов в строительных материалах эмпирическим соотношением [18]:

$$MЭД = 5,7 \cdot 10^{-4} \cdot A_{эфф} \quad (5.7)$$

Для открытой местности зависимость МЭД от средней величины эффективной удельной активности природных радионуклидов в грунтах имеет вид [17]:

$$MЭД = 3,7 \cdot 10^{-4} \cdot A_{эфф} \quad (5.8)$$

Задача контроля МЭД гамма-излучения решается наиболее просто. Пункты измерений МЭД следует распределять равномерно по площади здания и по этажам. Погрешность оценки значений МЭД не должна превышать 20 %.

Пример. В качестве значений МЭД, используют среднее арифметическое значение МЭД, рассчитанное по результатам измерений не менее чем в 20 пунктах, расположенных в радиусе до 200 м от обследуемого здания на участке местности с естественным грунтом.

На открытых участках МЭД гамма-излучения (Н) на уровне 0,1 м от поверхности земли не должна превышать 0,15 мкЗв/ч. На участках, где $0,15 < H < 0,3$ мкЗв/ч, должны быть определены удельные активности техногенных радионуклидов в почво-грунтах и решен вопрос о необходимости проведения дополнительных дезактивационных мероприятий.

На участках, где значения удельной эффективности радионуклидов в грунтах не превышает 370 Бк/кг, мероприятия по снижению их содержания в грунтах не проводятся.

Задача 3. Особенности формирования фактора равновесия. Рассчитать фактор равновесия F:

$$F = \frac{ЭРОА_{Rn}}{ОА_{Rn}} \quad (5.9)$$

Пример. Скорость воздухообмен в помещении оказывает наибольшее влияние на величину ЭРОА радона. Поэтому очень важно подготовить помещение таким образом, что бы значение «фактора равновесия» F в них удовлетворяло условию:

$$0,7 \leq F \leq 0,9. \quad (5.10)$$

Эти параметры примерно соответствует диапазону значений кратности воздухообмена в помещении 1,0-0,5 час⁻¹, наиболее типичному

для слабо проветриваемых помещений. Если значение F в период измерений будет больше 0,9, то может иметь место завышенная оценка ЭРОА_{пр} из-за переоценки вклада радона и торона, выделяющихся из строительных конструкций.

При измерениях все окна и двери в здании должны быть закрыты не менее чем за 12 часов до начала определений уровней ЭРОА и, кроме того, должно быть проверена система естественной вентиляции, обеспечивающая кратность воздухообмена не менее 0,5 час⁻¹.

Основная серия наблюдений включает в себя практически одновременные определения ОА и ЭРОА радона и ЭРОА торона. Выполняются во всех подвальных помещениях, предназначенных для пребывания в них людей.

В зданиях, построенных на участках со средним значения ППР выше 60 мБк/(с·м²), обследуются все подвальные помещения и помещения первого этажа, а также не менее 20% квартир, расположенных в разных частях здания во втором и последующих этажах.

6. РАДОН-КОРРЕКТИРУЮЩИЕ МЕРОПРИЯТИЯ

Мероприятия, снижающие радоновый риск (или радоновая реабилитация), следует предпринимать настолько скоро насколько практически возможно его осуществить. При высоких концентрациях радона рекомендуется еще большая оперативность воздействия. Для долговременного контроля радоновой проблемы любые корректирующие действия должны быть прописаны в национальных санитарных нормативах или технических условиях.

Мероприятия, снижающие радоновый риск, основываются либо на препятствовании проникновению радона в здания от почвы или удаление его после того, как он попал в помещение [72, 73, 93, 94, 123-125, 135, 149-164]. Наиболее распространенные методы реабилитации успешно применяются для широкого диапазона концентраций радона и включают в себя:

- изменения давления, связанного с предотвращением попадания радона внутрь здания (снижение давление почвенного воздуха содержащего радон;
 - увеличение вентиляции в подпольном пространстве;
 - создание положительного давления внутри помещений;
 - уменьшение концентрации радона после его попадания в строение (увеличение вентиляции);
- герметизация трещин и щелей в полу и вокруг точек входа почвенного воздуха (консервация внешнего обрамления строения или расконсервация пространства под строением)).

Наиболее подходящие решение для проведения корректирующих мероприятий в конкретном здании будет зависеть от ряда факторов, включая измеренную концентрации газа радона и тип здания. Путем правильного выбора методики реабилитации можно уменьшить концентрацию радона значительно ниже контрольного уровня в подавляющем большинстве зданий. Методики, которые используют внешний воздух для разбавления радона после его попадания в здание являются наиболее практичны, если концентрации радона

находятся в доконтрольном или слегка превышают контрольный уровень.

Некоторые домовладельцы выбирают поэтапную радоновую реабилитацию. Сначала реализуется самый простое или самое дешевое решение. После этого дом повторно проверяется, и если концентрация радона не была достаточно снижена, то в дальнейшем постепенно реализуются другие меры, до тех пор пока требуемое снижение радона не будет достигнуто.

6.1 Выбор типа противорадоновой защиты

Нормированных методов расчета требуемых параметров и определения оптимального типа противорадоновой защиты в настоящее время не существует. Процедура такого выбора носит эвристический характер и в каждом конкретном случае основана на анализе и качественной оценке ряда обстоятельств. Эффективность того или иного решения противорадоновой защиты существенно зависит от того, как в каждом конкретном случае сочетаются эти обстоятельства и типы использованных технических решений.

Наиболее эффективны сочетания нескольких технических решений противорадоновой защиты в одной конструкции. При выборе технических решений противорадоновой защиты рекомендуется учитывать следующие факторы и обстоятельства:

Интенсивность выделений радона на участке строительства. Чем выше интенсивность выделений радона из грунта на участке строительства и ниже допустимое содержание радона в помещениях здания, тем выше должна быть эффективность противорадоновой защиты.

Заглубленность здания. Чем больше заглубление здания, тем выше вероятность повышенных поступлений радона через пол и стены подвала. В Швеции принято, что дома должны быть лучше защищены от земли, чем это было раньше, для того чтобы поддерживать уровень радона низким.

Характеристики геологического разреза. В случае, когда верхние слои геологического разреза сложены из плотных, обладающих низкой газопроницаемостью пород, их удаление при

отрывке котлована может привести к повышению радоновой нагрузки на подземную часть здания.

Уровень грунтовых вод. При высоком уровне грунтовых вод и необходимости устройства дренажной системы она, обладая свойствами коллектора почвенного газа, может оказать как положительное, так и отрицательное воздействие на радоновую обстановку в основании здания. При проектировании дренажной системы рекомендуется предусматривать пути отвода радона из петли дренажных труб в атмосферу.

Назначение помещений подвального этажа и характеристики системы его вентиляции. При расположении в подземной части здания помещений с требуемым повышенным воздухообменом (например, гаражей) вероятность проникновения радона из подвальных помещений в помещения первого этажа снижается. При устройстве слабо вентилируемых подвалов и подполий радоноизолирующая способность их пола и перекрытия должна быть повышенной.

Схема расположения проемов для ввода-вывода инженерных коммуникаций в подземных ограждающих конструкциях здания. Рассредоточенность и большое число таких проемов повышает вероятность проникновения через них радона в здание.

Качество строительных работ. Радоноизолирующая способность ограждающих конструкций в решающей степени зависит от качества строительных работ. Использование некачественных материалов и нарушения технологии их применения могут свести к нулю эффективность противорадоновой защиты.

Пути обеспечения радиационной безопасности при проектировании зданий. Основными факторами, определяющими процесс формирования радоновой нагрузки [37, 50, 107]:

- способность грунтов к продуцированию радона, зависящая от концентрации в них радия-226 и их эманационной способности;
- строение и свойства геологического разреза (наличие или отсутствие разломной зоны, мощность слоев различного типа, газопроницаемость грунтов, уровень грунтовых вод и т.п.);
- величина заглубления здания.

Во многих национальных строительных нормах прописаны предварительные радоновые изыскания до начала строительства.

Оценку радоноопасности участка строительства нового здания обычно проводят в 2 стадии [30]. На первом этапе проводят измерения плотности потока радона (ППР) на уровне земли в пределах контура строящегося здания. Минимальное число пунктов измерений на уровне поверхности земли при площади здания $S < 1200 \text{ м}^2$ рассчитывают из условия: 11 точка на каждые 30 м^2 (но не менее 20 точек в целом на участке). При площади здания $S > 1200 \text{ м}^2$ число контрольных точек N определяют по формуле

$$N = 40 + \sqrt{\frac{S - 1200}{60}} \quad (6.1)$$

При реконструкциях, измерение ППР проводят на прилегающих к периметру здания.

Строительные нормы для новых домов должны отвечать таким образом, чтобы предотвращать приток радона более чем приблизительно один кубический метр воздуха почвы в час. В таком случае риск радона внутри помещений будет на низком уровне, отвечая приблизительно 140 Бк/м^3 внутри помещений при концентрации радона в почвенном воздухе является $\sim 50000 \text{ Бк/м}^3$.

Для строительства зданий производственного назначения следует выбирать участки территории, где плотность потока радона с поверхности грунта не превышает $250 \text{ мБк/(м}^2 \cdot \text{с)}$. При проектировании строительства здания на участке с плотностью потока радона с поверхности грунта более $250 \text{ мБк/(м}^2 \cdot \text{с)}$ в проекте здания должна быть представлена система защиты от радона зафиксированная в радиационно-гигиеническом паспорте территорий.

При выборе участков территорий под строительство жилых домов и зданий социально-бытового назначения предпочтительны участки с гамма-фоном, не превышающим $0,3 \text{ мкГр/ч}$ и плотностью потока радона с поверхности грунта не более $80 \text{ мБк/(м}^2 \cdot \text{с)}$. При отводе для строительства здания участка с плотностью потока радона более $80 \text{ мБк/(м}^2 \cdot \text{с)}$ в проекте здания

должна быть предусмотрена система защиты от радона (монолитная бетонная подушка, улучшенная изоляция перекрытия подвального помещения и др.). Необходимость радонозащитных мероприятий при плотности потока радона с поверхности грунта менее $80 \text{ мБк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ определяется в каждом отдельном случае по согласованию с органом государственной санитарно-эпидемиологической службы.

1-й класс – протирадоновая защита не нужна (ППР до $80 \text{ мБк}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$);

2-й класс – умеренная протирадоновая защита (ППР $80 - 250 \text{ мБк}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$);

3-й класс – усиленная протирадоновая защита (ППР более $250 \text{ мБк}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$).

В соответствии с рекомендациями Шведского центра радиационной безопасности разработаны технические требования к строительным нормам касательно концентраций радона в почвенном воздухе. Когда концентрация радона в почвенном воздухе составляет от $10\,000$ и $50\,000 \text{ Бк}/\text{м}^3$, дома должны иметь радон-защитную конструкцию. Когда концентрация радона превышает $50\,000 \text{ Бк}/\text{м}^3$, при строительстве домов должны учитываться радон-безопасный нормативы и правила. Если концентрация радона ниже $10\,000 \text{ Бк}/\text{м}^3$, никаких ограничений на строительство не накладывается. Для комплексного планирования грунта должна быть классифицирована на уровни риска радона: высокий, нормальный и низкий.

Эта классификация включает ситуацию, когда строительство планируется на коренных породах или наносах. Если принять во внимание проницаемости ила или глины, то в этом случае высокая концентрация радона в грунте может быть уменьшена низкой проницаемостью осадков.

6.2 Распространенные методы радоновой реабилитации

Герметизация основных путей поступления радона в помещения:

1. Открытые дренажные колодцы. Они должны быть закрыты воздухонепроницаемой металлической крышкой с

уплотнениями вокруг трубы для откачки воды и вводы электропитания. При необходимости дренажный колодец может пассивно вентилироваться при помощи трубы, выведенной из крышки колодца в оконце подвального помещения.

2. Водяные затворы в виде изогнутой трубки, которыми необходимо оборудовать дренажные отверстия, должны быть постоянно заполнены водой.

3. Отсутствующие участки плиты. Если в подвальном помещении имеются участки с земляным (грунтовым) полом, не закрытые бетонной плитой, то их следует залить бетонным раствором.

4. Отверстия в плите подвального помещения и стенах фундамента. Такие отверстия должны быть закрыты при помощи строительного раствора, цемента, специальных силиконовых герметиков.

5. Отверстия в верхнем ряду блоков стены фундамента. Отверстия, через которые подпочвенный воздух попадает в здание, как правило, невелики или скрыты за различными деталями конструкции здания. малые трещины могут играть существенную роль в поступлении в здание подпочвенного воздуха, содержащего радон. В зданиях, имеющих подпольное пространство, тщательная герметизация вводов труб водоснабжения и канализации, проходящих через перекрытие, разделяющее эти две части здания, заметно снижает поступление радона в жилые помещения.

Герметизация полов и стен. Теоретически можно предотвратить попадание радона с земли путем герметизации всех точек входа почвенного газа - трещины в твердой основе полов, трещины или отверстия на контакте с земли и стен; зазоры вокруг кабелей или труб. Практически полная герметичность барьеров, сохраняющих свои свойства в течении длительного времени, - достаточно сложная и труднодостижимая задача. Полная герметизация путей поступления радона в здание требуется в тех случаях, когда это является основной мерой противорадоновой защиты. На практике, эффективного уплотнения часто крайне трудно достичь. Уплотнение всех точек входа радона включает в себя удаление напольных покрытий, плинтусов и затем герметизацию всех трещин и швов

подходящим герметиком. Герметик должен быть прочным и достаточно гибким, чтобы компенсировать будущее движение строительных материалов.

Даже если 90% всех отверстий будут загерметизированы, то радон может войти через остальные 10% и вполне вероятно, что только небольшое снижение радонового уровня может быть достигнуто. На практике уплотнение полов и стен используется в сочетании с другими методами.

Для герметизации могут быть использованы различные материалы: с высокой вязкостью (замазки, герметики, пены, смолы, битумные покрытия); с низкой исходной вязкостью (краски, эмали, полимеризирующие материалы); пленочный листовый газонепроницаемый материал.

В общем случае, для прекращения действия физических и химических процессов, вызывающих разрушение кладки и накопление радона в подвальных помещениях, рекомендовано выполнить комплекс мероприятий:

- 1) биологическая обработка стен;
- 2) восстановление внешней гидроизоляции наружных стен подвальных помещений инъекционным способом без вскрытия фундамента (нагнетание через наклонные скважины гелеобразующей полимерной композиции);
- 3) гидроизоляция внутренних стен (смесь на основе жидкого стекла, кремнеорганических продуктов, силиконов, осмотических цементов);
- 4) гидрофобизирующая защита кладки стен от капиллярного подсоса воды.

Эмиссия радона из стен уменьшается при облицовке стен пластиковыми материалами типа полиамида, поливинилхлорида, полиэтилена, покраски на основе краски с эпоксидной основой или 3-мя слоями масляной краски.

Для пола рациональным комплексом оказалось использование материалов на основе полимерных соединений: поливинилхлорид, полиэтилен, каучук. Сварку защитных покрытий выполнять высокочастотным методом. Применяется также покрытие поверхностей полимерными материалами способом пламенного напыления, в котором используют

полистирол, полиэтилен, фторопласт. Применяют самоклеющиеся пленки.

Для изоляции полов в жилых помещениях используется материал «Флормэйт 200» на основе экструдированного пенополистирола [27].

Отверстия в верхнем ряду блоков стены фундамента или жилого помещения. Стены фундамента или всего здания могут быть сложены из полых бетонных или шлаковых блоков. В этом случае в стенах имеются пустоты, по которым возможно поступление радона из подстилающих зданий грунтов – непосредственно в подвальное и жилое помещение. В каждое открытое отверстие в блоках следует закладывать материал, обеспечивающий опору герметизирующему составу. поверх такой опоры укладывается слой строительного раствора или полиуретановой пены.

Метод дренажного всасывания. Дренаж должен быть размещен вокруг фундамента и отводить потоки воздуха от попадания внутрь помещений. Этот метод разработан для извлечения радона из почвы вокруг дома и отвода его подальше от дома (рис. 57, табл. 23).

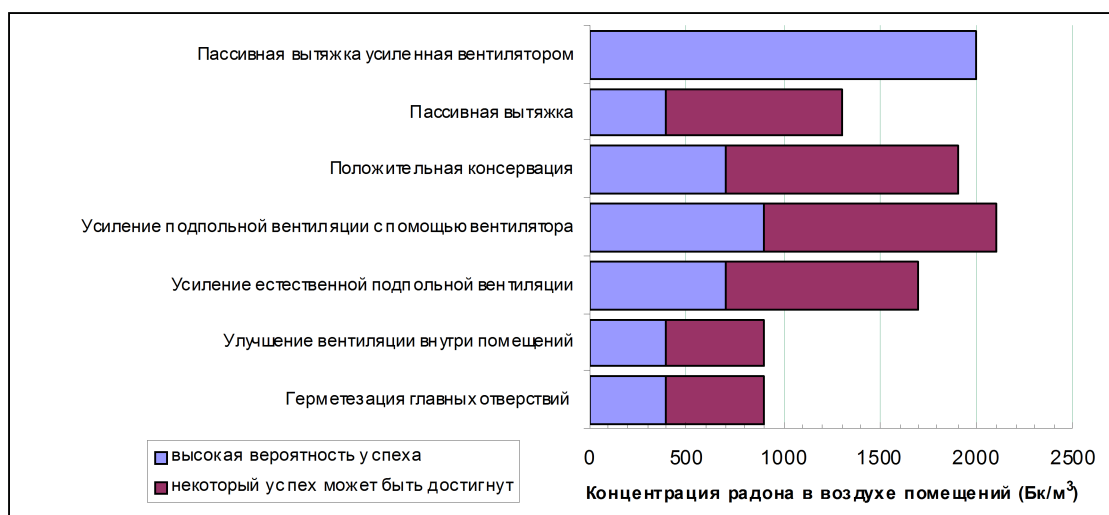


Рис. 57 – Руководство сравнительной эффективности радон-корректирующих методов

Открытые участки грунта. На открытых участках в подвальных помещениях производится частичная выемка грунта. Углубление заполняется гравием или керамзитом,

насыпается слой песка и укладывается полиэтиленовый лист, играющий роль противорадонового барьера. Все открытые участки грунта в подвальном помещении должны быть загерметизированы путем заливки слоем бетонного раствора.

Табл. 23 – Различные методики уменьшения уровня радона

| Методика | Типичное уменьшение уровня радона, в % | Комментарии |
|---|--|--|
| Вытяжка из-под плиты перекрытия (расконсервирование плиты перекрытия) | 50-90 | Самым эффективным методом является если воздух может легко циркулировать под плитой |
| Пассивная вытяжка из-под плиты перекрытия | 30-70 | Может быть более эффективным в холодном климате; но не достаточно эффективен как вытяжка из-под плиты перекрытия |
| Дренажная вытяжка | 50-99 | Может использоваться с или частично с другими противорадоновыми решениями |
| Вытяжка из стенных блоков | 50-99 | Только в домах с пустотелыми блочными стенами; требуется изоляция основных отверстий |
| Вытяжка из колодца-отстойника | 50-99 | Эффективен если воздух перемещается свободно в колодец-отстойник под плитой перекрытия |
| Подмембранное снижение давления в подполе | 50-99 | Меньшие потери тепла, чем при естественной вентиляции в холодном зимнем климате |
| Природная вентиляция в подполе | 0-50 | Стоимость непостоянная |
| Герметизация каналов попадания радона в помещение | Сильно зависит от технологии, материалов и т.д. Обычно стоимость | Обычно используется только с другими методиками; требуется |

| Методика | Типичное уменьшение уровня радона, в % | Комментарии |
|---|--|---|
| | этой техники сопоставима с общим ремонтом дома | подходящие материалы и установка |
| Консервация дома (подвала) | 50-99 | Эффективнее всего с изолированным с улицы непроницаемым фундаментом и верхних этажей |
| Природная вентиляция | Вариабельна / Зависит от времени | Значительные потери нагретого или охлажденного воздуха; стоимость эксплуатации зависит от мощности и количества вентиляторов |
| Тепловозвратная вентиляция | Изменчива | Ограниченное использование; эффективность ограничена концентрацией радона или объемом вентилируемого воздуха, способного разбавлять содержание радона. Лучше применять в ограниченном пространстве, например, в подвалах. |
| Частные скважинные системы водоснабжения: аэрация | 95-99 | В основном более эффективен чем фильтры с активированным углем; требуют ежегодной очистки для сохранения эффективности и предотвращения загрязнения; требуют вентиляцию радона с выводом наружу |
| Частные скважинные системы водоснабжения: гранулированный | 85-95 | Менее эффективен для высоких уровней радона нежели аэрация; используется для умеренных уровней |

| Методика | Типичное уменьшение уровня радона, в % | Комментарии |
|----------------------|--|--|
| активированный уголь | | радона, около 50000 пКи/л или меньшее количество в воде: ДПР поглощаются углем, поэтому следует следить за уровнем радиации вокруг коллектора с помощью экрана или щита, а также уходом и удалением коллектора |

Способы улучшения микроклимата в жилых и производственных помещениях

- 1) способы, улучшающие качество воздушной среды
 - a. корректный выбор расчетных исходных параметров внутреннего и наружного воздуха;
 - b. использование приточных установок, не загрязняющих воздух;
 - c. повышение степени очистки приточного воздуха;
 - d. сбалансированный воздухообмен;
 - e. повышение эффективности естественной вентиляции;
 - f. правильное размещение устройств
- 2) энергосберегающие способы, без ухудшения качества воздушной среды
 - a. утилизация тепла удаляемого воздуха;
 - b. регулирование параметров воздуха в помещении;
 - c.
- 3) способы улучшения качества воздушной среды при одновременной экономии электроэнергии
 - a. выявление источников загрязнения воздуха и их устранение без затрат электроэнергии;
 - b. удаление загрязненного воздуха путем устройства или усиления естественных сквозняков в подвалах;
 - c. усовершенствование существующей системы регулирования и обслуживания принудительных вентиляционных систем

Увеличение вентиляции с наружным воздухообменом. Концентрация радона в воздухе помещений является результатом динамического баланса между степенью вхождения (или продуцирования) радона и степени его удаления, с которым сильно связана вентиляционная система. Лучше всего иметь вентиляционную систему перед проведением дорогостоящих исследований и скорректировать неправильно работающую вентиляционную систему как первый шаг ответа на радоновую проблему.

Изменение режима работы вентиляционной системы может вызвать эффект увеличения или уменьшения радоновых уровней.

Неблагоприятные условия (с точки зрения вентиляции) для накопления радона в зданиях:

- области без механической вентиляции имеют тенденцию к образованию отрицательного давления и доминировать над сквозняками и стек-эффектом;
- области, которые сформированы вытяжной вентиляцией;
- туалеты, кухни, научные лаборатории, гардеробные обычно имеют отрицательную тягу; необходимо держать двери открытыми.

Вентиляция имеет преимущество в том, что оно полностью пассивно и не требует долговременной поддержки. Экономически выгодно, и к тому же позволяет улучшить качество воздуха внутри помещений.

Эффективно уменьшает высокие уровни радона простейшее средство – простое проветривание открытием окон в доме с низкими или повышенными уровнями и/или, когда нужно, усиливается вентиляцией. Зимой двукратное снижение может быть получено с использованием простых домашних вращающихся вентиляторов.

Если представляется возможным, для увеличения вентиляции в доме разблокируют вентиляционные отверстия, обеспечивают дополнительные вентиляционные отверстия стены. Увеличение вентиляционного перемешивания воздуха с радоном в помещении с наружным воздухом снижает концентрацию радона в воздухе. Увеличение вентиляции также уменьшает разрежение

в доме и тем самым уменьшает тенденцию втягивания радона. Увеличение вентиляции должно выполняться на уровне первого этажа, так как увеличения вентиляции в верхних этажах может привести к увеличению концентрации радона вследствие стек-эффекта.

Увеличение вентиляции между этажами. Увеличение потока воздуха подполом может уменьшить количество радона, поступающего в здание. Это включает в себя установку дополнительных вентиляционных отверстий подпола, установки решеток или очистку (или замену) существующих. Размещение вентиляционных решеток имеет смысл, т.к. они позволяют повысить эффективность вентиляции путем уменьшения "мертвого пространства" недоступным для вентиляции участков помещения.

В сравнении с другими методами, подпольное всасывание труднее для выполнения, так как это предполагает размещение труб под домом (в поперечном направлении через боковые стенки или сверления отверстий в бетонной плите) и установкой вентилятора для продувки этих труб.

Если будет установлено, что желаемое снижение концентрации радона не было достигнуто, можно увеличить количество принудительной вентиляции в подполе. Вентиляторы могут быть установлены для продувания воздуха в подпольном пространстве (нагнетательная вентиляция) или вытягивания воздуха из подпольного пространства (вытяжная вентиляция).

Стены из бетонных блоков домов могут провентилированы высасыванием воздуха из полостей в стене и отвода его от дома. Описанные способы приводят к снижению отрицательного давления в доме, приводящему к всасыванию воздуха пропорционально потерям его из дымовых труб, сушилок и т.д.. И наоборот, положительное давление нагнетания в герметичный подвал из верхних этажей.

Поддержание положительного давления. Депрессия давления подпочвенного воздуха в основании фундамента обеспечивает высокую проницаемость для воздуха в грунтах под строящимся зданием. Оно достигается созданием гравийной подушки под возводимым фундаментом. В эту подушку и грунты по периметру здания укладывают перфорированные пластиковые

или пористые керамические трубы, который используют для вентиляции грунтов и для дренирования грунтовых, дождевых и талых вод. При наличии капитальных стен, уходящих в землю ниже пола подвального помещения, в стенах на уровне гравийной подушки делаются отверстия. Для монолитного фундамента это осуществляется путем закладки поперек стены отрезков керамической трубы.

Давление накапливающегося в подвалах радона превышает такое для открытого грунта, что создает барический барьер, препятствующий проникновению радона в здание. Необходимо предусматривать создание пассивной и активной вентиляционной систем путем уплотнения и герметизации воздушных отверстий, окон и дверей для предотвращения потоков воздуха из здания наружу, а также разрежением внутреннего давления, что вызывает подсос грунтового воздуха в подвальные помещения и на первые этажи зданий.

Частный случай реализации метода положительного давления включает в себя накачивание воздуха в дом через специально установленный вентиляторный блок на чердаке, что позволит достичь очень небольшого положительного давления относительно наружного воздуха. Это уменьшает накопления радона вследствие вытеснения воздуха через трещины, швы, окна и проемы. Поддержание положительного давления имеет эффект увеличения вентиляции и тем самым снижает концентрацию радона путем разбавления. Поддержание положительного давления лучше всего достигается в относительно герметичных домах.

Радоновый колодец (подпольное депрессирование). Радоновый колодец содержит емкость, размещенную непосредственно под плитой перекрытия, которая открыта для окружающего подпола решеткой и связана трубой с выходом на улицу. Радоновый колодец работает по способу обратного давления между пространством подпола и вышерасположенным помещением. Обогащенный радоном воздух, поступающий от земли обращается вниз в подпол с помощью электрического вентилятора в трубопроводе и поэтому предотвращается попадание радона в пространство внутренних помещений (рис. 39).

Его можно использовать с вентилятором и балластной камерой, выполняя таким образом функцию активного картера. В случае, когда вентилятор не используется, такая компоновка носит название пассивного картера. Пассивный картер имеет то преимущество, что не несет эксплуатационных расходов (и не производит шума). Однако, он менее надежен нежели активный аналог и, по большому счету, подходит для концентраций радона до нескольких сотен Бк/м³. В случае высоких концентраций радона - сотни Бк/м³ и выше, как правило, используют активный картер, как более эффективное решение. Пассивную систему можно модернизировать до активной добавлением вентилятора.

Количество используемых картеров зависит от планировки здания, площади пола и начальной концентрации радона. Как правило, один картер уже эффективен над поверхностью перекрытия площадью 250 м². Несколько картеров могут быть связаны друг с другом и обслуживаются одним вентилятором.

Системы очистки воды и методы аэрации могут быть полезными в районах с высоким уровнем радона в системе коммунального водоснабжения. Обычно эти системы представляют собой угольный фильтр, хотя сам фильтр представляет потенциальную трудность в размещении и является потенциальным источником повышенной дозы внешнего облучения. Системы очистки воздуха не рекомендуются, поскольку они не были признаны эффективными.

На практике, обычно реализуются комбинации нескольких методик, которые можно объединить по их целевой направленности:

- 1) радон-корректирующие мероприятия с использованием активной расконсервации грунта;
- 2) радон-корректирующие мероприятия с использованием вентиляционной системы.

1. Радон-корректирующие мероприятия с использованием активной расконсервации грунта (*active soil depressurization ASD*) направлены на предотвращение вхождения радона (табл. 24, рис. 58). *ASD* наиболее распространенный метод радонового контроля и наиболее часто включаем в план радоновой реабилитации для

помещений с концентрациями радона свыше 10 пКи/л (370 Бк/м³).

Табл. 24 – Радон-корректирующие мероприятия с использованием активной расконсервации почвы

| Метод <i>ASD</i> имеет несколько преимуществ | Недостатки <i>ASD</i> : |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • эффективен для любых доконтрольных радоновых концентраций; • более широко изучен в применении к широкому ряду условий и мест строительства; • вентиляторы используются в системах <i>ASD</i> сравнительно мало; • системы <i>ASD</i> не очень задействованы при нормальной деятельности (закрывание и открывание окон). | <ul style="list-style-type: none"> • задействован только до радона и других почвенных газов и не корректирует другие проблемы; • перед использованием системы <i>ASD</i> необходимо герметизировать крупные отверстия на земле для исправления чрезмерного отрицательного давления в строении; |

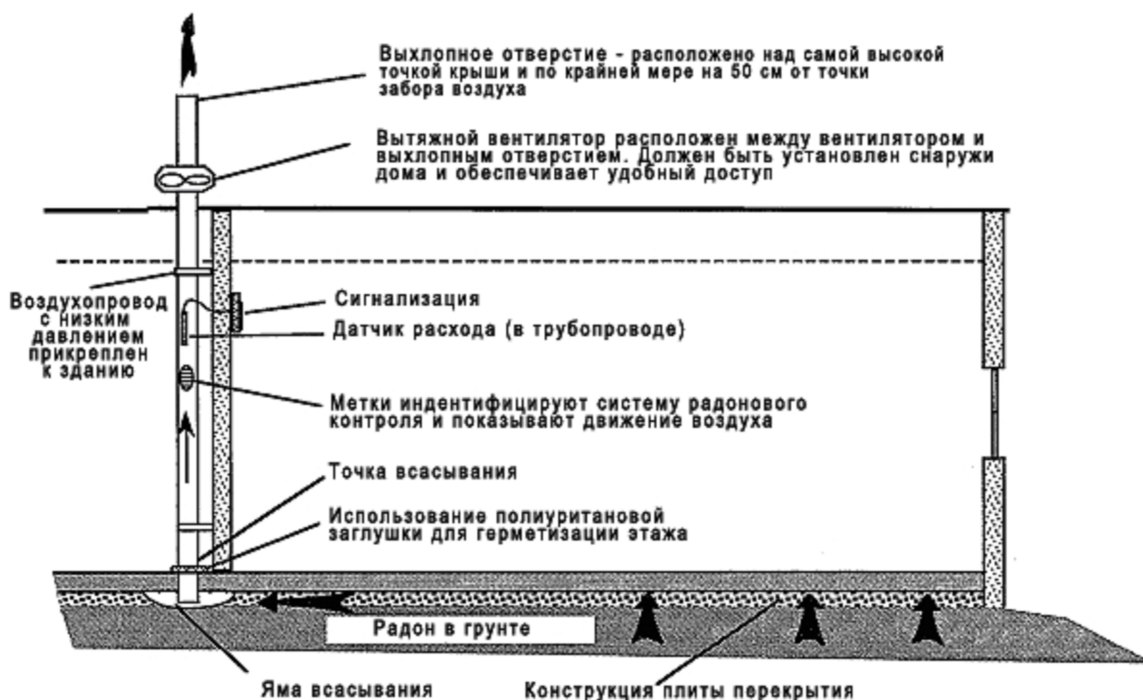


Рис. 58 – Схема метода *ASD*

Система *ASD* оперирует с образованием поля отрицательного давления в почве внизу фундамента здания. Вследствие того, что большинство зданий имеет плиты перекрытия и поэтому система *ASD* соотносится с "подплитной расконсервацией". Однако,

почвенная расконсервация может быть дополнена в объектах без плит перекрытия подплитной вытяжкой, смонтированной под мембрану.

Наиболее реализуемое снижение давления воздуха под плитой перекрытия или под мембранной (до уровня ниже давления воздуха в комнатах на первом этаже) приведет к невозможности радона перетекать в здание. Если существуют любые трещины и поры в плите перекрытия и фундаментной стенке, воздух может перебежать во внутреннее пространство здания с подплитной области.

2) Радон-корректирующие мероприятия с использованием вентиляционной системы. Вентиляционная система может иногда быть скорректирована таким образом, чтобы вводить добавочное количество внешнего воздуха и таким образом понижать концентрацию радона его разбавлением (табл. 25, рис. 59). Разбавление внешним воздухом является успешным подходом для контроля радона, в случае: 1) если изначальные и последующие тесты показывают, что концентрация радона не выше чем 370 Бк/м³; 2) рабочие места не поддерживают с достаточной мерой вентиляцию с внешним воздухом; 3) существующая вентиляционная система имеет достаточную мощность для увеличения потока внешнего воздуха.

Табл. 25 – Радон-корректирующие мероприятия с использованием вентиляционной системы

| Методы разбавление имеет несколько преимуществ как подхода смягчения: | Недостатки методов разбавления: |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • предлагается как альтернатива для зданий, где не принятый ASD; • применим к зданиям, где есть вентилятор; • в большинстве случаев, увеличение потока внешнего воздуха улучшит общее качество воздуха внутри помещений; • даже если разбавление в одиночку не может снизить | <ul style="list-style-type: none"> • одиночное использование не достигнет успеха если дореабилитационные уровни радона выше чем 370 Бк/м³; • поток внешнего воздуха должен поддерживаться постоянно в течении нахождения в помещении людей для контроля |

| | |
|--|--|
| <p>радоновый уровень ниже 148 Бк/м³, он остается ценным методом как средство поддержания других противорадионных мероприятий.</p> | <p>радоновой концентрации; при замерзании - уровни радона возвращаются к дореабилитационные уровням;</p> |
|--|--|

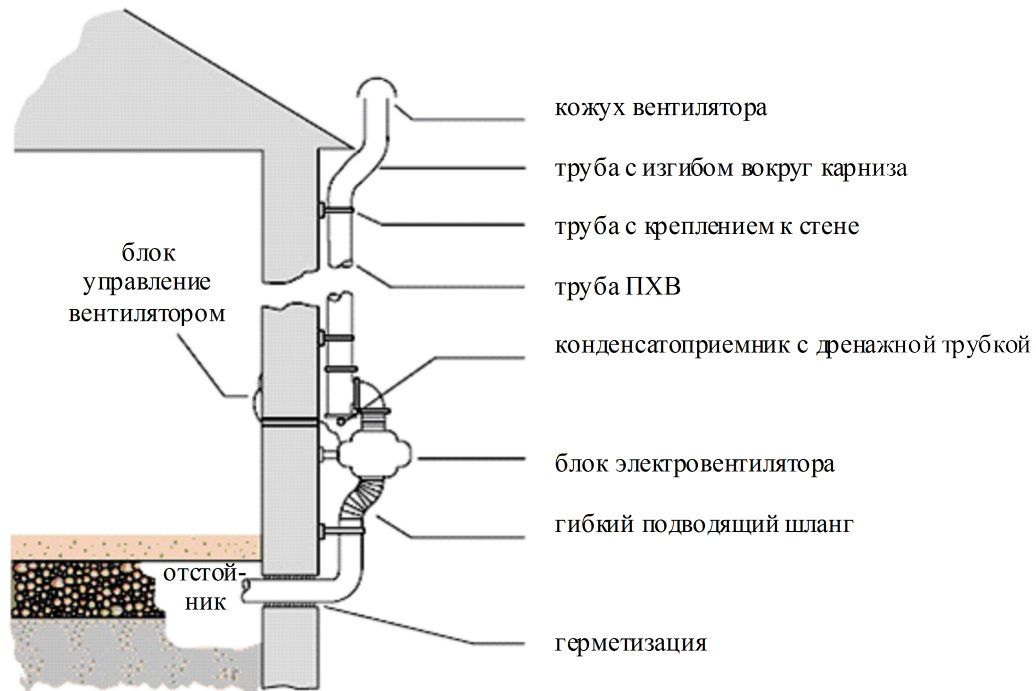


Рис. 59 – Схема общего обустройства системы корректирующих действий радона с использованием вентиляции

После выполнения мероприятий по радоновой реабилитации все жилища следует переаттестовать для того, чтобы убедиться, что уровни радона снижены в достаточной мере (рис. 60). Это измерение следует провести как минимум длительностью в 3 месяца.

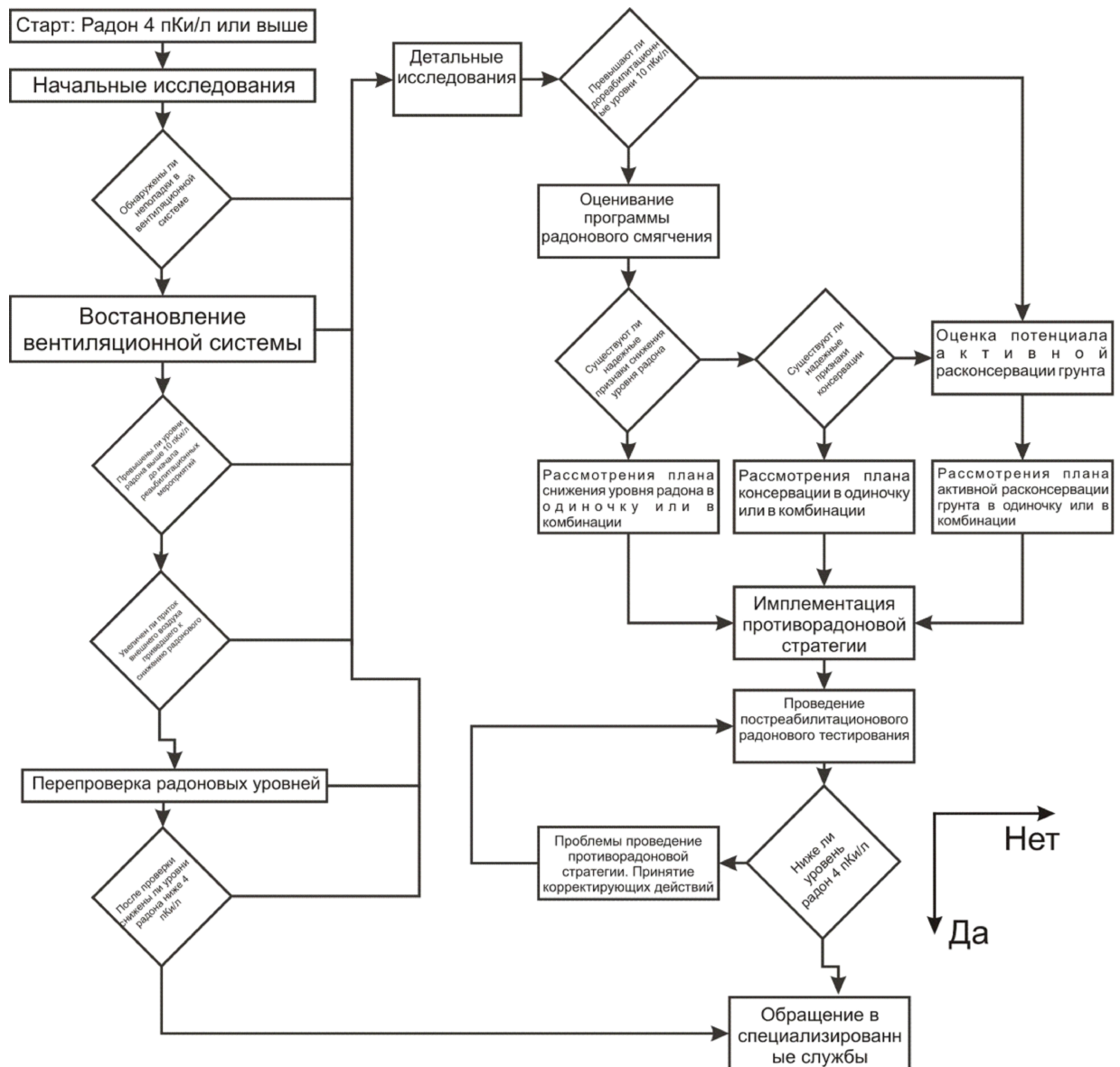


Рис. 60 – Обобщенная схема принятия радон-корректирующих мероприятий

7 КАРТИРОВАНИЕ РАДОНОВЫХ РИСКОВ

7.1 Районы подверженные радоновому риску

В районах, подверженных радоновому риску, распределение концентрации радона может быть достаточно широким. В то же время, большинство измеренных значений радона, в связи с установленным его логнормальным распределением, будут низкими. И может случаться, что жилища с высокими концентрациями радона, не будут классифицироваться как объекты подверженные действию радона, поскольку будут находиться в области с массовыми низкими содержаниями радона. Поэтому, радоновые изыскания должны проводиться с целью выявления радоновых уровней в любом здании, которые могут быть связаны с высокой концентрацией радона.

Районы, подверженные радоновому риску, могут быть определены непосредственно с помощью измерения концентрации радона в воздухе помещений или косвенно, используя концентрацию радона в почве, при условии, если есть установленная корреляция с концентрациями радона в домах. Хотя, важнейшим фактором выделения высокорадоновых районов является наличие повышенного уровня радона в домах.

Существуют различные способы определения границ районов, подверженных радоновому риску. Часто площадь таких районов определяется по проценту домов с концентрацией радона, превышающей контрольный уровень, как это принято в ряде стран Британского Содружества и США. Различные уровни радона в пределах районов подверженных действию радона относятся к категории «высокий», «средний» или «низкий». Такая классификация сложная и учитывает как средний уровень радона, так и опорный уровень и ряд других характеристик.

Отдельного решения требует вопрос совмещения радонового потенциала, полученного в геологических границах с границами административными. Если административные границы очень маленькие, а геологические условия более гомогенны, оценивание не должно быть слишком сложным. Но очевидно, что даже в пределах городских границ, не очень гетерогенная

геологическая ситуация может вызывать сильную изменчивость радонового потенциала. Естественным методом может выступить присвоение наивысшего наблюдаемого значения геогенического радонового потенциала всей административной области в пределах которой была зафиксированы значения радоновых уровней. Хотя для других областей этот подход может вызвать определенное переусиление радонового риска. При его применении возможно также выделение класса района с наивысшим геогеническим радоновым потенциалом. При этом он будет действовать до более детальной проверки и сравнения. Напротив, другой способ предполагает присвоение различным застраиваемым областям, в крупных административных районах со сложными геологическими условиями, соответствующего ранжированного класса геогенического радонового потенциала. В этих классах учитывается большее множество факторов. Наряду с прямыми измерениями радона в воздухе помещений, также уровни почвенного радона, коэффициенты перехода его в воздух помещений, характеристики почв, геологические особенности и т.д. Потому, более расширенный подход рекомендуется для поддержания условий безопасности и в тоже время позволит избежать ненужных затрат.

7.2 Радоновые карты

Радоновые карты могут быть полезным инструментом в реализации национальной политики радона. Они используются в качестве инструмента для оптимизации поисков домов с высокой концентрацией радона; идентификации областей для проведения специальных профилактических мероприятий (превентивных противорадоновых мер) во время нового строительства; коррекции радоновой ситуации в существующих зданиях; могут лечь в основу дополнительных и тестовых измерений радона. Радоновые карты, в общем своем назначении, должны использоваться для целей направления ресурсов на изучения радоновой ситуации в районах, подверженных радоновому риску, а не быть простым указанием областей, где эти измерения не нужны.

Радоновые карты строятся на материалах радоновой съемки. Но содержание и качество радоновой съемки отличается в разных странах (приложение «Радоновые карты и карты радоновых рисков ряда стран Европы и США»). Главные особенности национальных радоновых съемок, которые не позволяют унифицировать нормативно-регуляторную базу, и как следствие получать сопоставимые и кондиционные радоновые карты сводятся к таким особенностям:

- измерительная технология и способы картирование отличается между странами;
- радоновые измерения пригодны только в своих национальных нормативах (нет единого европейского радонового уровня);
- уровень концентрации радона трудно предсказать (моделирование и интерполяция не всегда однозначны);

Ведущие эксперты по радону, в сентябре 2006 на Радоновом семинаре (Radon investigations in Czech Republic VII and the fourth International Workshop on the Geological aspects of radon risk mapping, Prague, Czech Rep., 1998) договорились о сотрудничестве в подготовке европейской радоновой карты. Главными пунктами соглашения являлось:

- осуществление радоновой политики на основе двух основных стратегий мониторинга/картирования радона:
 - 1) массовая кампания по измерению радона в воздухе помещений (~2 млн жилых домов в Европе) позволяет провести прямую оценку облучения и улучшает сопоставимость данных;
 - 2) целевая переменная радоновой съемки - установление различных характеристик распределения радона в жилых комнатах;
- измерения радона в почвенном воздухе позволяет очертить радон-уязвимые районы и выполнить их генерализацию;
- получения статистик (минимальное, максимальное, среднее, стандартное отклонение) в измерений воздуха внутри помещений по 10x10 км координатной сетки;
- дальнейшие исследовательские работы по картированию геогенического радона на основе измерений почвы, сопоставлений с геологической информацией и почвенными изысканиями;

- разработка карт радоновых рисков и публикациях их в масштабе 1:200000; последующее распространение в органах государственной власти и частных компаниях, занимающихся радоновой проблематикой.

В таких странах, как Великобритания, США, Ирландия, радоновые карты составляются на основе измерений уровней радона в воздухе помещений и охватывают всю страну [115, 144, 164, 167]. США разработали свою радоновую карту на основе сочетания измерений радона в воздухе помещений, геологических характеристик, радиоактивности, проницаемость почвы и коренных пород [85, 87, 138, 158]. В Германии радоновая карта основана на измерениях концентрации радона в почвенном газе [105, 142]. В Австрии она основывается на значениях средней концентрации радона в данной области [78].

Карты радонового риска. Построение карт радоновых рисков - главное средство представления результатов радоновых программ для полного оценивания угроз от облучения радоном и принятия соответствующих мероприятий. В разных странах реализуются различные способы построения карт радоновых рисков [26, 28, 70]. Используются различные ГИС для оцифровки, обработки и интеграции данных, в том числе геологических карт, данных о концентрации радона, административных карт и т.д.

Карта радоновых рисков Швеции показывает области с высоким, нормальным и низким радоновым риском. Области высокого риска являются те, где концентрация радона в почвенном воздухе, превышает 50 кБк/м^3 [540]. Карты радоновых рисков составляются с 1982 года, и на настоящий момент охватывают 65% территории Швеции с текущим дообследованием неохваченных территорий и детализацией участков с высоким риском.

Области радонового риска в Ирландии определяются по сетке $10 \times 10 \text{ км}$, а присвоение атрибута «радон-уязвимых» получали те области, в которых предсказанный процент домов с концентрацией радона выше 200 Бк/м^3 составляет 10% или больше.

Несмотря на различное качество карт радоновых рисков, они дают ценную информацию для проектировщиков и строителей. Несмотря на то, что основной целью карт радоновых рисков было

предоставление информации для планирования и строительства новых дома, она также оказалась полезной в указании на области, в которых существующие дома имеют повышенные уровни радона внутри помещений. Полученная карта радоновых рисков может упростить любое последующее административное действие и должно быть включено в разработку будущих радоновых и экологических обследований.

Обобщая европейский опыт в создании карт радоновых рисков, можно утверждать, что для построения региональных радоновых карт, в масштабе 1:50000 или больше, следует привлекать следующие данные:

- 1) измерения мощности экспозиционной дозы;
- 2) содержания радона в почвенном воздухе;
- 3) результаты измерений радона в воздухе зданий;
- 4) гамма-спектрометрические данные об уране (аэро- и наземная съемки);
- 5) геологические карты;
- 6) карты почв (состав почвы, мощность почвенных горизонтов, зерновой анализ, проницаемость);
- 7) гидрогеологические карты (уровень подземных вод);
- 8) классификация радоновых рисков;
- 9) Детальные обследования (например, на стройплощадке):
 - геологическая экспертиза или отображение области;
 - измерения гамма-излучения (радиометрическая документация);
 - измерения гамма-излучения спектрометрические, чтобы определить концентрацию радия в почве;
 - измерение содержания радона в почвенном воздухе.

Измерения мощности экспозиционной дозы.

Радиометрические карты являются полезным инструментом для оценивания радонового риска. Для некоторых областей, они дают всю информацию, требуемую для картирования радоновых рисков, а для других они могут привлечь внимание туда, где радоновый риск может быть высоким [121]. Но, в большинстве случаев, обязательно должна быть проведена наземная заверка полученных данных. Особое внимание должно быть обращено на границы между почвой и коренными породами в областях с

гетерогенным геогеническим радоновым потенциалом. В таких случаях, следует провести детальные геологические наблюдения вместе со спектрометрическими измерениями. В случае, если наблюдаются низкие МЭД, то часто возможно классифицировать данную область как область низкого радонового потенциала без каких либо оговорок.

Существуют способы пересчета МЭД в соответствующие радоновые уровни. Для этого используются данные по содержанию урана, тория и калия (полученным по аэрогамма-спектрометрическим наблюдениям или полевым замерам). Однако важно помнить, что более чем 75% полевой измеренной радиации происходит с верхнего 2-дециметрового слоя почвы. Даже если гамма-радиация выше уровня 0,12-0,15 мкЗв/час, то содержание радия-226 в коренных породах или почве может быть таким высоким, чтобы генерировать содержание радона в почвенном воздухе на уровне 50000 Бк/м³. Также гамма-радиация может также быть связана с содержанием тория (и продуктов его распада) и калия-40 (хотя содержание калия-40 в коренных породах и почве никогда не превышает в эквиваленте 0,08 мкЗв/час) (рис. 61). Усиленная торием радиация может не отразиться на усилении радонового риска, за исключением того случая, когда концентрация тория очень высока (больше 300 Бк/кг). В этом случае, торон может представлять угрозу здоровью.

С 1980 г. уровень гамма-излучения 0,3 мкЗв/час был выбран мерой риска радона в жилищах Швеции [54].

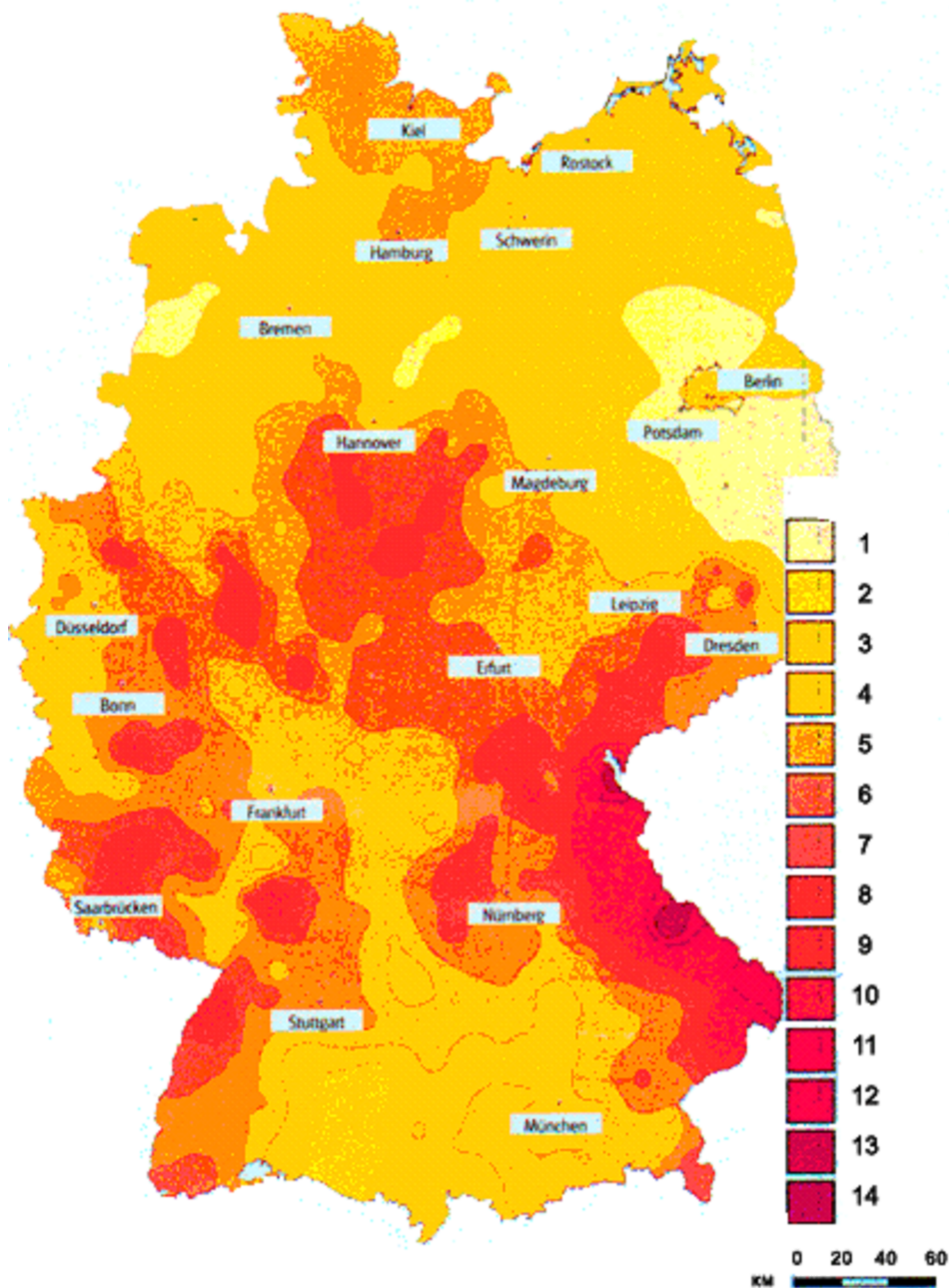


Рис. 61 – Мощность дозы на поверхности земли

(по данным эманационной съемки в ФРГ [68]; градации МЭД в мкЗв/час: 1) <0,03, 2) 0,03 – 0,04; 23) 0,04 – 0,05; 4) 0,05 – 0,06; 5) 0,06 – 0,07; 6) 0,07 – 0,08; 7) 0,08 – 0,09; 8) 0,09 – 0,10; 9) 0,10 – 0,11; 10) 0,11 – 0,12; 11) 0,12 – 0,13; 12) 0,13 – 0,14; 13) 0,14 – 0,15; 14) >0,15.

Содержания радона в почвенном воздухе. Когда выполняется картирование крупных областей, необходимо определенным образом ориентировать радоновые измерения. Натурные измерения выбирают из геологических данных для получения максимума информации о распределении радона в почвах.

Однако, количество радоновых измерений должно быть ограничено с точки зрения экономических причин. Следует помнить, что измерения радона в почвенном воздухе являются относительными для объекта исследования. Наилучшее, получить о радоновых уровнях в почве вместе с определением типа почв и содержания радия. Иначе получение данные о измерениях радона будут представлять собою очень существенную вариацию радонового потенциала в различных местах.

Существует значительное количество фактов, говорящих о значительной позитивной корреляции между концентрацией радона в почвенном воздухе и концентрацией радона в воздухе помещений (рис. 62).

По результатам исследования распределения ЭРОА в г. Киеве, уже выявлены дома с ЭРОА около 900 Бк/м^3 при концентрации его в грунтах изученных территорий от 10 кБк/м^3 до 20 кБк/м^3 и более. К особо опасным для проживания населения отнесены площади с концентрациями радона в подпочвенном воздухе более 40 кБк/м^3 ; а к опасным - от 20 кБк/м^3 до 40 кБк/м^3 [27].

Например для Германии усредненные уровни между почвенным радоном и радоном внутри помещений составляет 500 кБк/м^3 к 1000 Бк/м^3 , что уже определяет т.н. «диапазон действий». С этим отношением 1:500 концентрация радона в почвенном воздухе больше чем 125 кБк/м^3 может давать рост до превышения верхнего предела «нормального диапазона» концентрации радона в жилищах Германии 250 Бк/м^3 . Ценность геогенического прогнозирования с помощью статистического оценивания корреляции между геологическими измерениями почвенного радона вблизи домов и соответствующими долговременными измерениями радона внутри помещений также принимается во внимание при анализе конструкции здания и его возраста [105, 106, 109, 110].

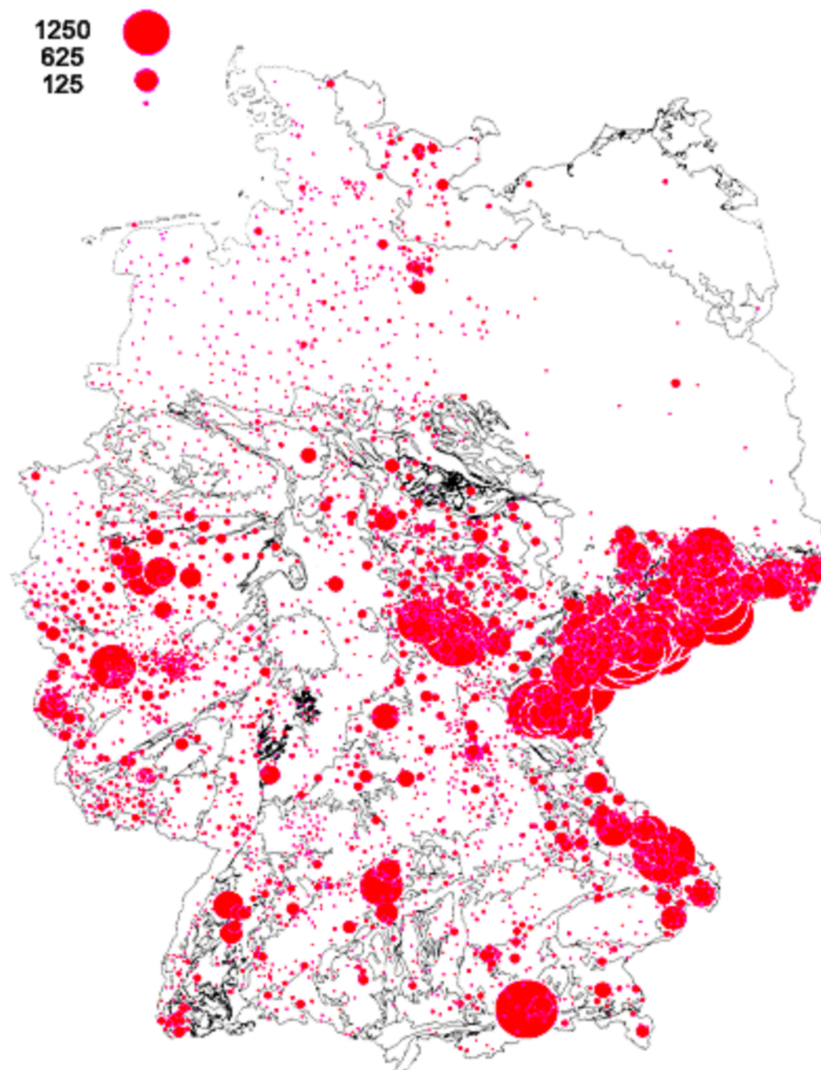


Рис. 62 – Карта распределения радона в воздухе помещений [60]
 Величина окружности - концентрация радона в Бк/м³ (Geologisches Institut.
 Univ. Bonn, Bundesamt für Strahlenschutz, Februar 2000)

Стандартизированное измерение почвенного радона, апробированного во время проведения радоновой съемки в Германии включало проходку одиночного шпура глубиной 1 м, для отбора пробы воздуха на радон и определение проницаемости (рис. 63). Отверстия для опробования почвенного газа выполняются через весь почвенный слой и коренные породы на глубину 0,7-1,0 м вокруг каждого дома. Заглубление больше 1 м необходимо для того, чтобы уменьшить эффект вентиляции почвы ветром и эффект просачивания почвенного слоя дождевыми водами. По возможности, почвенный горизонт и горизонт грунтовых вод определялись по буровой колонке.

производился отбор образцов пород и почв, и в некоторых случаях, и грунтовых вод, на предмет определения содержания радона.

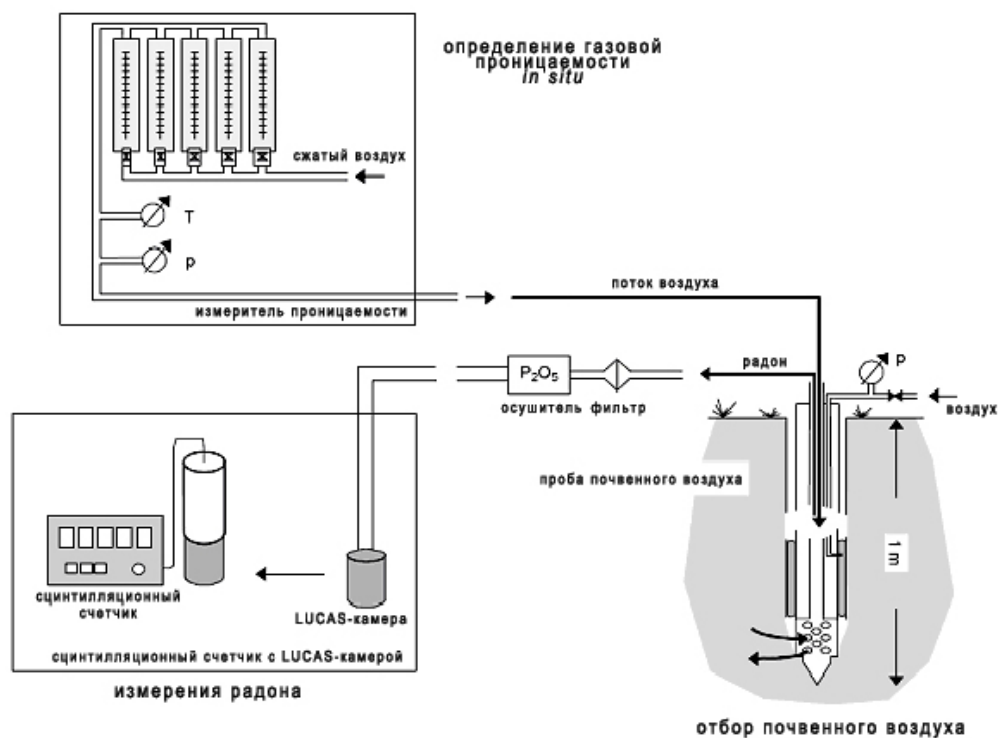


Рис. 63 – Измерения концентрационной активности радона в почвенном газе и газовой проницаемости *in situ*

Крайне важным условием, являлось проведение измерение концентрации радона в почвенном воздухе вокруг домов и под нижними плитами перекрытия на глубине один метр или более (рис. 64).

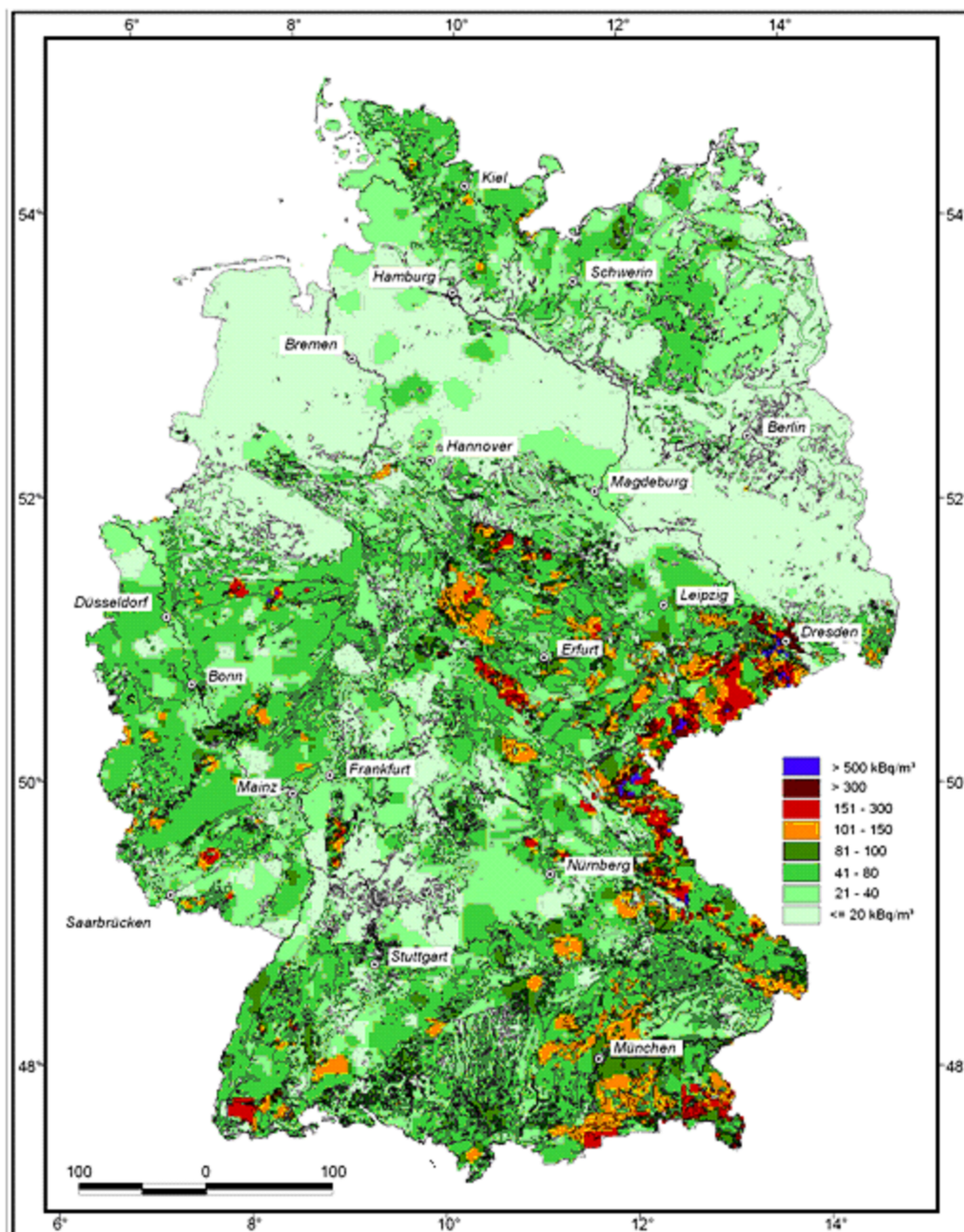


Рис. 64 – Радон в почвенном воздухе Германии, в кБк/м³ (Kemski & Partner, 2003) [68]

В практике эманационных исследований используется несколько методов измерений содержания радона в почвенном воздухе. Эманометры используются для получения надежных результатов в проницаемых почвах (песок, гравий), но они дают высоковариабельные значения для непроницаемых почв (ил, глины). Сильная изменчивость обуславливается содержанием влаги, а также наличием и подвижностью воздуха почвы.

Применение интегральных радоновых детекторов (таких как активированный уголь) гарантирует надежность результатов в большинстве случаев. Но в таких почвах как глины, площадь поверхности в нижней части точки измерения должна быть увеличена, для большего доступа радона. В противном случае результаты могут занижаться.

Применение альфа-трековых пленок, несмотря на свою долгую историю использования, не лишено недостатков касательно надежности и воспроизводимых результатов. Результаты часто занижены по сравнению с реальной концентрацией радона в воздухе почвы. Использование торонных фильтров улучшает ситуацию, но не всегда. Детекторы размещаются на глубине 1 м, где радон в почвенном газе в наименьшей степени зависит от изменения атмосферных явлений. Зачастую использование этих детекторов обусловлено низкими затратами. Время измерения для трекового детектора составляет 3-6 недель, для детектора на активированном угле - 4-8 дней.

В каждой точке измерения в протокол измерений заноситься максимальное и среднее арифметическое значение из 3-х точек опробования.

В Швеции принято минимальную глубину шпура для измерения почвенного радона устанавливать на 0,7 м. Цель радоновых измерений - установление похожей эманационной обстановки, в которой будет пребывать строящееся здание. Но, после окончания строительства, эксгаляция радона значительно уменьшается вследствие замены почвенного покрова плитой перекрытия, асфальтированием дорог и глинистой прослойкой. Это заставляет радоновую концентрацию в поровом пространстве увеличиваться до максимума. И этот максимум концентрации может быть выражен следующим образом:

$$Q_{max} = Q_{Ra} e \delta \frac{1 - kp}{kp} \quad (7.1),$$

где Q_{max} – концентрация радона в поровом пространстве, Бк/м³; Q_{Ra} – активность радона-226, Бк/кг; e – коэффициент эманации, %; δ – удельная плотность, кг/м³; kp – пористость, %; e – не может превышать p , $e \leq p$.

Гамма-спектрометрические данные о уране (аэро- и наземная съемки). Гамма-спектрометрические данные о содержании K, U и Th, отражают природные характеристики коренных пород и используются в качестве входных данных для отображения рисков радона [58, 122, 129].

Шведский опыт показывает, что для правильной интерпретации данных спектрометрического анализа в контексте содержания радона в почвенном воздухе, в ходе опытных работ, необходимо:

1) выделить дома для обследования расположенных на разных коренных породах (приблизительно 2 на породах с уран-ториевой специализацией и 2 с урановой специализацией);

2) выделить дома для обследования расположенных на разных типах почв.

Данные о содержании урана могут служить в качестве полезного инструмента для определения источников радона и миграции пути в домах и для мониторинга воздействия на окружающую среду. Ожидается, что в зонах повышенного радонового риска мощность экспозиционной дозы от почвы и коренных пород будет больше 0,3 мкЗв/час, что дает возможность применять аэрогаммасъемку.

Измерения гамма-излучение также выполняются по наземным и шпуровым точкам измерения, для этого подготавливают шпуры в грунте и коренных породах вокруг каждого дома. Измеренная гамма-радиация на грунте и в шпурах; определяют содержание радия, тория и калия в почвах и коренных породах [147].

Определение содержание радия-226 необходимо для оценки того, как много радона, образованного в почве, переходит в почвенный воздух. Он также делает возможным определение почвенного горизонта, ответственного за формирования радона. Обычная ситуация, когда концентрация радия-226 в 12 Бк/кг (или 1 ppm урана) дает максимум концентрации 20 кБк/м³ в поровом пространстве почвы.

Классификация районов на основе корреляционного анализа U-Rn. Корреляцию можно ясно наблюдать в кислых магматитах (сиенитах, гранодиоритах и диоритах) при крайне высоких значениях U и Rn [125, 126]. Но в интервале обычных значений

(U до 10 ppm и Rn до 50 Бк/м³), что типично для осадочных и метаморфизованных пород - корреляция выражена не ясно (рис. 65, 66).



Рис. 65 – Определения радия, тория и калия из почвы и фундамента с использованием гамма-спектрометрических измерений (SGU – Геологическая служба Швеции)

Позитивная U - Rn корреляция отвечает таким геологическим условиям:

- тектонические структуры, особенно с урановой минерализацией;
- контакты разнотипных пород;
- нахождение уран-контрастных типов пород;
- загрязнение окружающей среды урановой добычей и использования уран-содержащих материалов со строительной целью.

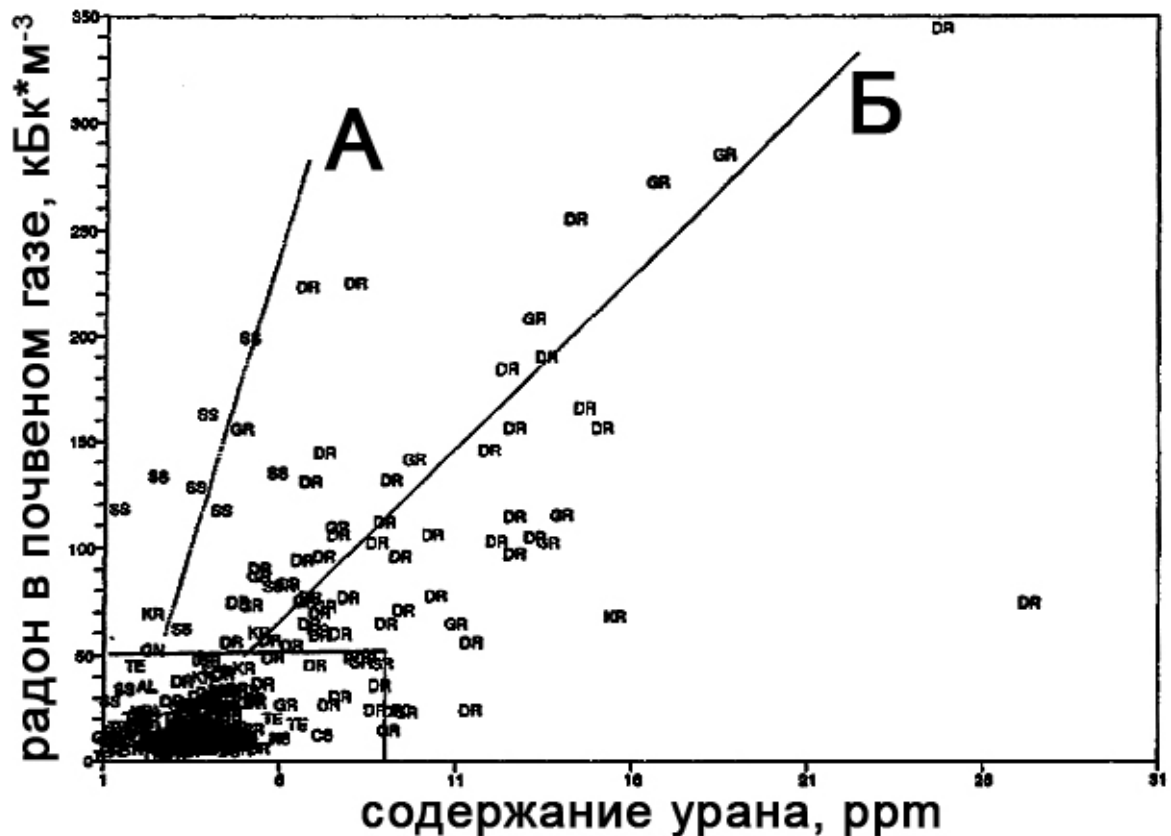


Рис. 66 – Соотношение радона в почвенном газе и содержания урана в гранитах (DR, GR) и силурийских черных сланцах (SS) Богемского массива.

В центре символа - среднее значение за 15 измерений; А – система «радон – уран» в силурийских сланцах; Б - система «радон – уран» в гранитных породах [58]

Данные о содержании урана в региональном плане, можно использовать для разграничения ожидаемых уровней радона в различных типах горных пород, особенно контрастных [62]. Но они не могут быть использованы для прямого преобразования в содержание радона в типах пород с низким содержанием урана. Для них уровни радона находятся под сильным влиянием местной геологической среды и особенностей почвы (проницаемость, влажность почвы, особенности вертикального почвенного профиля). В локальном масштабе данные о содержании урана можно использовать в качестве добавочной информации для диагностики тестовых площадок мест на радон.

Сильную корреляцию можно наблюдать в специфических геологических условиях (тектонические зоны, особенно с урановой минерализацией; контакты контрастных типов пород).

В районах, где развиты ураноносные породы и концентрация урана составляет 10-40 ppm, концентрация радона превышает 800 Бк/м³ в более чем 30% измеренных домов. В пределах развития торий-содержащих пород, где концентрация урана часто не больше чем 3-5 ppm, 1-5% всех домов имеют больше 400 Бк/м³ [54].

7.3 Численное моделирование радонового потенциала

Разработана математическая модель RAETRAD для расчета концентрации радона в любом данном месте в многослойной почве и подстилающих отложениях до глубины 5 м [128].

Модель учитывает значение диффузионных и конвективных компонентов движения радона в почвенном газе. Модельному уравнению необходимы данные о содержании радия из слоев почвы и горных пород в материнском горизонте, эманлирующей мощности почвенного вещества, содержании влаги в почве, сезонных колебаниях грунтовых вод и проницаемости почвы, плотности и пористости.

$$\nabla \times f_a D \nabla (C_b / f_s) - \nabla \times [(9K / \mu)(C_b / f_s) \nabla P] - \lambda C_b + R \rho \lambda E = 0, (7.2)$$

где ∇ – градиент-оператор; $f_a = h(lS + Sk_H)$; p – пористость почвы; S – коэффициент водонасыщения; k_H – коэффициент распределения радона-222 между водой и воздухом с модели Генри (б.р.); D – коэффициент диффузии для радона в почвенном пористом пространстве (см²·сек⁻¹); $C_b = f_s C_a$ – концентрация радона в удельном объеме (пКи·см⁻³); C_a – концентрация радона в воздухонаполненном поровом пространстве; $f_s = P(1 - S + Sk_H) + \rho k_a$; ρ – объемная плотность почвы в сухом состоянии (г·см⁻³); $k_a = k_{ab} \cdot \exp(-b \cdot S)$; k_{ab} – коэффициент адсорбции в сухом состоянии для радона-222 (г·см⁻³); b – адсорбция-влажность корреляционная постоянная (г·см⁻³); K – удельная воздушная проницаемость почвы (см²); μ – динамическая вязкость воздуха (Па·с); ∇P – градиент давления воздуха (Па·см⁻¹); λ – постоянная распада радона (2,1·10⁻⁶ сек⁻¹); R – почвенная концентрация радона (пКи·г⁻¹); E – общий коэффициент эманации радона (воздух+вода, б. р.).

Концентрации радия в верхнем слое почвы (0-2 м) являются средними эквивалентными значениями радия, которые рассчитываются по интенсивности гамма-излучения ^{214}Bi данных аэрогаммасъемки. Концентрацию радия в нижних слоях (2-5 м) получают на основе расчетов аэроданных, а также результатов анализа содержания на радий в отобранных образцах. Другие параметры модели оцениваются на основе измерения физических свойств, карт почв и различных эмпирических отношений между содержанием радия и мощностью эманаций.

Результаты модели RAETRAD позволяют устанавливать концентрацию радона в различных точках. Для этого вводится отдельная компонента модели, описывающая мощность потока радона, которая рассчитывается (в пКи/с или мКи/год) по выражению (7.3);

$$Q = 10 \left[(C_s p_s D_s A_h) v_c + (C_c p_s D_s A_c) / t_c + A_c C_c v \right], \quad (7.3)$$

где Q – мощность потока радона в воздух внутри помещений (пКи с^{-1}); C_s – площадно-взвешенная средняя концентрация радона под плитой перекрытия (пКи л^{-1}); p_s – эффективная общая пористость бетона; D_c – коэффициент диффузии радона в бетоне ($\text{см}^2 \text{сек}^{-1}$); A_h – площадь пола дома (м^2); t_c – толщина бетонной плиты (см); C_c – концентрация радона на уровне фундамента (пКи л^{-1}); p_s – эффективная общая пористость на поверхности; D_s – коэффициент диффузии радона в почвенном слое ($\text{см}^2 \text{сек}^{-1}$); A_c – общая площадь трещин пола (м^2); v – скорость потока воздуха через трещины пола ($\text{см} \text{с}^{-1}$).

Характеристики модели определяются для каждого из исследуемых полигонов или наиболее представительному ему типу для целой серии полигонов. В свою очередь, полигоны получают путем слияния цифровой геологической карты с обобщенной цифровой почвенной картой. Каждому полигону присваивается уникальное имя с атрибутами содержания радия и почвы. Минимальные размеры полигона, как правило, лежат в диапазоне от 2,56 до 10 км^2 .

Для поверхностных слоев каждого полигона содержание радия напрямую рассчитывается с аэроданных содержания урана или другим приемлемым способом.

7.4 Классификация радоновых рисков

Повышенные содержания радия и высокая проницаемость позволяет классифицировать их как «почвы высокого радонового риска». Высокую проницаемость имеют почвы с гравийный, песчаным или щебнистым материалом (табл. 26.).

Табл. 26 – Классификация грунтов касательно радонового риска
(Национальный шведский совет городского планирования и строительства, 1982)

| Региональная классификация | Примеры |
|----------------------------|--|
| Области высокого риска | Породы фундамента и грунтов содержат радийсодержащий материал (уран-обогащенные граниты, алюнитовые сланцы). Грунты с высокой эманацией (гравий, гравелиты, песчаные наносы) |
| Области нормального риска | Грунт с нормализованным содержанием радия, около 25-50 Бк/м ³ (гнейсы, сланцы) |
| Области низкого риска | Грунт, где содержание радия низкое, меньше 30 Бк/кг (известняки, песчаники, основные изверженные породы и вулканические породы) |

Высокопроницаемые почвы могут относиться к высокому радоновому риску, даже если содержание радона в них невелико (табл. 27 - 28).

Табл. 27 – Классификация радоновых рисков на основе измерений радона в почвенном газе и определения проницаемости [25]

| Радоновый риск | Радон в почвенном газе ²²² Rn, кБк/м ³ | | |
|----------------|--|-----------------------|-----------------------|
| | Низкая проницаемость | Средняя проницаемость | Высокая проницаемость |
| Низкий | <30 | <20 | <10 |
| Средний | 30 - 100 | 20 - 70 | 10 - 30 |
| Высокий | >100 | >70 | >30 |

Табл. 28 – Классификация грунтов за радоновыми рисками [101-103]

| Порода или почва | Активная концентрация радия | Концентрация радона в почвенном воздухе |
|------------------|-----------------------------|---|
| | | |

| | | (на глубине 1 м), кБк/м ³ |
|---|----------|---|
| Высокорадоновый грунт | | |
| Породы поверхности фундамента (уран-обогащенные породы: черные сланцы, урано- обогащенные граниты и пегматиты, урановая минерализация) | >200 | |
| Дробленная порода | >80 | |
| Гравий, крупнозернистый песок и глянцевая валунная глина | >50 | >50 |
| Наносы | >70 | >60 |
| Глина, глянцевая валунная глина | >100 | >100 |
| Нормальнорадиоактивный грунт | | |
| Нормальная валунная глина | 15-50 | 5000-40000 |
| Валунная глина с гранитным материалом | 30-75 | 20000-60000 |
| Валунная глина с гранит- обогащенным гранитным материалом | 75-350 | 40000-200000 |
| Гравий и крупнозернистый песок в гляциофлювиальных отложениях | 20-75 | 10000-150000 |
| Песок и крупнозернистые наносы | 5-25 | 4000-20000 |
| Наносы | 10-50 | 20000-60000 |
| Глина | 25-100 | 10000-120000 |
| Почвы содержащие алюнитовые сланцы | 175-2500 | 50000->1000000 |
| Низкорадоновый грунт | | |
| Породы поверхности фундамента | <60 | |
| Дробленые породы, гляцевая валунная глина, гравий, песок, крупнозернистые наносы | <25 | <10 |
| Влажные наносы (больше 2 м толщиной) | <50 | <20 |
| Влажные глины (больше 2 м толщиной) | <80 | <60 |

Категории радоновых рисков в строительстве.

Классификация приведена в табл. 24 и является слишком грубой для того чтобы быть использованной для оценки места. В исследованиях для строительства сооружений более подробную классификацию риска радона для разные виды грунта используется (табл. 29).

Когда исследуются малые области, такие как площадки под строительство, работы начинают с измерения гамма-радиации в воздухе. Если обнаружена повышенная гамма-радиация, более чем 0,12 мкЗв/час для почв и более чем 0,15 мкЗв/час для пород, выбор решения влияют ли породы на радоновый риск или нет, решается проведением измерения по определению содержания радия-226 спектрометрическим способом. Если гамма-радиация с почвы усилена, радоновый потенциал может быть определен с натуральных измерений гамма-спектрометром или измерениями концентрации радона в почвенном воздухе. Однако, если присутствуют выходы коренных пород на месте обследования или почвенный слой тонок, меньше 1 м мощностью и невозможно провести измерения содержания радона, эти результаты будут сильно занижены касательно будущей радоновой ситуации в строящемся доме. Подобная ситуация может встретиться при наличии дробленных пород. В этом случае содержание радона будет зависеть от режима вентиляции ветром толщи дробленной породы.

В Швеции приняты рекомендации до строительства еще в 1982 году:

в случае высокорадонного грунта - действуют условия "радоновой безопасности";

в случае нормальнорадонного грунта - "радон предупредительные" условия;

в случае низкорадонного грунта - "условные" антирадоновые меры.

Табл. 29 – Ранжирование радоновых рисков для строительства

| Грунт вокруг строений | Концентрация радона в почвенном газе, кБк/м³ | Технические требования к строительству |
|------------------------------|--|---|
| Высокорадонный грунт | >50 | Радонобезопасное строительство |

| | | | |
|--------------------------|-------|---|---|
| Нормальнорадоновый грунт | 10-50 | Строительство радонозащитными мероприятиями | с |
| Низкорадоновый грунт | <10 | Ничего | |

Эта классификация включает положение здания, основанной на коренных породах и учитывает проницаемость ила и глины. В последнем случае более высокие концентрации радона в воздухе почвы может быть терпимо из-за низкой проницаемости отложений [54].

На большой выборке сопоставлений концентарций радона в воздухе зданий и почвенном газе выявлено [27], что в незащищенных от поступления грунтах его среднегодовая эквивалентная активность обычно не превышает 1% от ОА радона в подпочвенном воздухе. При активности радона в грунтах порядка 10000 Бк/м³ его активность в помещениях составляет около 100 Бк/м³. Уровень в 10000 Бк/м³ можно использовать как ориентировочный критерий для оценки потенциальной радоноопасности территории застройки. При уровне активности радона в грунте, превышающей 10000 Бк/м³, рекомендуется планировать соответствующие радонозащитные мероприятия.

7.5 Геоинформационное моделирование радоновых рисков

Прежде всего геостатистика представляет интерес для структурного анализа радон-уязвимых районов, но может пригодиться при общей качественной оценке или моделирование специальными маркерами исследуемых территорий.

Феноменологическая основа геоинформационного моделирования - корреляция между концентрацией радона и геологическими особенностями области. Радон широко распространен и присутствует в небольших количествах во всех породах и почвах. Высокие уровни радона обнаружены в районах, где нет урановой минерализации, но в большинстве ситуаций, больше радона обнаруживается в породах с высоким

содержанием урана, чем в породах с низким его содержанием. Поэтому первоочередная задача при проведении геостатистического оценивания - определение геологических структур, имеющих одинаковое отношение с радоновым потенциалом. Такая геологическая классификация направлена на разделение различных свойств радонового потенциала, что не обязательно совпадает с традиционными геологическими классификациями.

Немецкий опыт свидетельствует о том, что при отсутствии функциональной связи между двумя параметрами и геогеническим радоновым потенциалом, возможно использование эмпирической ранговой классификации. Каждый из двух параметров подразделяется на три класса, где концентрация радона в почвенном воздухе имеет больший вес. По наполнению ранговой матрицы класс радонового потенциала получает ранг от 1 до 6 (рис.67).

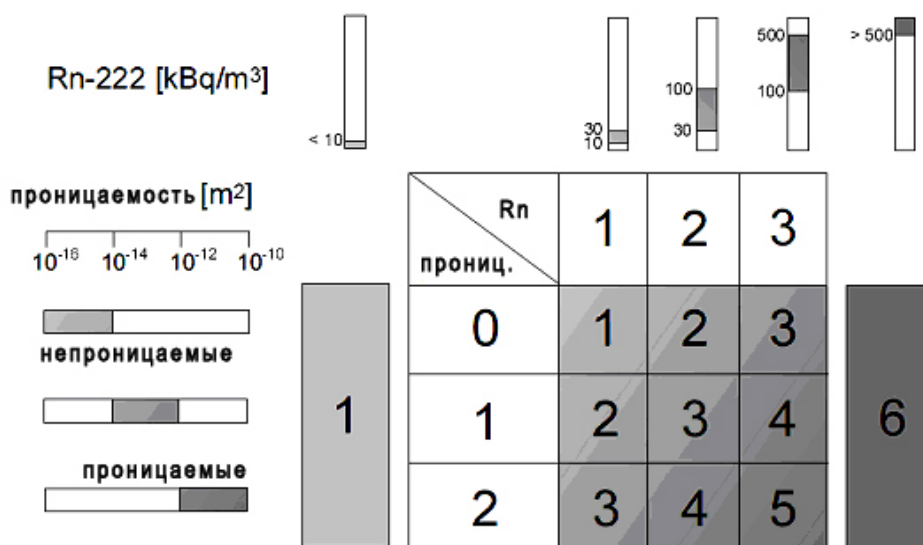


Рис. 67 – Классификация геогенического радонового потенциала с помощью ранговой матрицы концентрации радона в почвенном газе и газовой проницаемости

Как правило, на основе геостатистического картирования и пространственного анализа ранжируется радоновый риск конкретной области с определением всего трех категорий: 1) высокая степень риска, 2) средняя степень риска, 3) низкая степень риска.

"Высокорадоновая" область. Существует много способов определить высокорадоновую область. Во некоторых странах принято включать определенный процент жилищ в области, где превышает референтный уровень радона или уровень действия (карты радоновых рисков Республоики Ирландия и Великобритании приложения «Радоновые карты и карты радоновых рисков ряда стран Европы и США»).

В Украине градация избрана по первому принципу. Городская агломерация г. Киева ранжируется нами по трем категориям:

1 - опасные площади, где в помещениях зданий разного назначения установлены концентрации радона более 200 Бк/м³;

2 - небезопасные, с вероятностью обнаружения отдельных помещений с ЭРОА радона более 50-100 Бк/м³;

3 - безопасные, где превышения допустимого уровня (50-100 Бк/м³) в помещениях зданий, расположенных на обследованной площади, не фиксируется [27].

В Ирландии высокорадоновой областью считается область 10x10 км где более 10% и больше жилищ имеют радоновый уровень более 200 Бк/м³.

В Великобритании выделяется три категории жилищ относительно уровня в 200 Бк/м³.

низкововероятностный уровень < 1 % превышает уровень действия;

промежуточно-вероятностный уровень - 1-10%

высокововероятностный уровень - больше 10%.

В США область высокорадонowego потенциала с предсказанным средним уровнем >4pКи/л (>148 Бк/м³). Распределение концентрации почвенного радона подразделяются на категории:

1) «низкий» (<10 кБк/м³);

2) «средний» (10-100 кБк/м³);

3) «повышенный» (100 -500 кБк/м³);

4) «высокий» (>500 кБк/м³).

В Бельгии, уровень больше 250 Бк/м³ - высокий радоновый риск; 150-250 Бк/м³ - средний и ниже 100-150 Бк/м³ - низкий. Причем в Бельгии определение радонового риска увязано с двумя параметрами: уровнем радона в помещениях и относительным

количеством помещений, превышающих уровень действия (рис. 68).

| | | | | | |
|---|-------|-------|-----|-----|-------------------|
| | | | | 65 | % |
| | | | | 60 | |
| | | | | 55 | |
| | | | | 50 | |
| 190 | 195 | 200 | 205 | 210 | Бк/м ³ |
| Радон в домах, % превышающей уровень действия | | | | | |
| | | | | | |
| >50 | 30-49 | 10-29 | 5-9 | <49 | |

Рис. 68 – Ранговая матрица классификации радонового риска [169]

В случае анализа пространственной связи между высокорадоновыми домами и кригинговой картой возможно выполнить наложение всех измеренных домов на кригинг-контурную карту концентраций радона. Это даст контурные уровни на границы категории радонового риска. Большинство высокорадоновых домов (или более чем 90% домов с концентрациями R_n выше реферативного уровня) называется *аномальной зоной*.

Геостатистические методы дают нам полезные инструменты для изучения пространственной структуры концентрации радона в воздухе помещений или в составе почвенного газа. В частности логнормальный кригинг является мощным средством для отображения и анализа концентрации R_n . С помощью вариограммам, полученным по картам распределения радона, оцениваются взаимосвязи между различными пространственными данными [14, 23, 35, 168], производится их физико-вещественная и геологическая интерпретация.

Пространственно-факторный анализ данных радоновых измерений имеет сильную информационную мощь касательно кластеризации и установления корреляции между измерениями в соседних природных и антропогенных объектах.

Гридинг (gridding) – процедура перехода от неравномерного распределения точек исходных данных к равномерной

регулярной сети (grid), размеры которой задаются исследователем (рис. 69).

По своей сути применяемые методы интерполяции – это реализация различных способов взвешивания исходных данных в зависимости от расстояния. Например *кригинг* является способом интерполяции с наименьшей дисперсией. В большинстве методов интерполяции необходимо задать диаметр поискового круга. Все точки, попавшие в поисковый круг, используются для расчета искомого значения. При этом необходимо вычислить вес каждой точки (взвешивание), другими словами, ее вклад в искомое значение. Веса в той или иной мере зависят от узла до этой точки.

Кригинг является линейным методом в том смысле, что необходимое значение $V(x_0, y_0)$ определяется с применением среднего взвешенного значений $V(x_i, y_i)$ точек попавших в поисковый круг: $V(x_0, y_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i V(x_i, y_i)$.

Значения $V(x_i, y_i)$ берутся из исходной таблицы, а веса λ_i из решения матрицы:

$$\bar{\lambda} = \begin{pmatrix} \gamma(\rho_{11}) & \gamma(\rho_{1n}) & 1 \\ \gamma(\rho_{n1}) & \gamma(\rho_{nn}) & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \gamma(\rho_{01}) \\ \gamma(\rho_{0n}) \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (7.4)$$

При этом $\mu = \lambda_{n+1}$ показывает ошибку кригинга – чем меньше μ , тем лучше сработала кригинговая процедура; ρ_{ij} - расстояние между i -й и j -й точками, попавшими в поисковый круг.

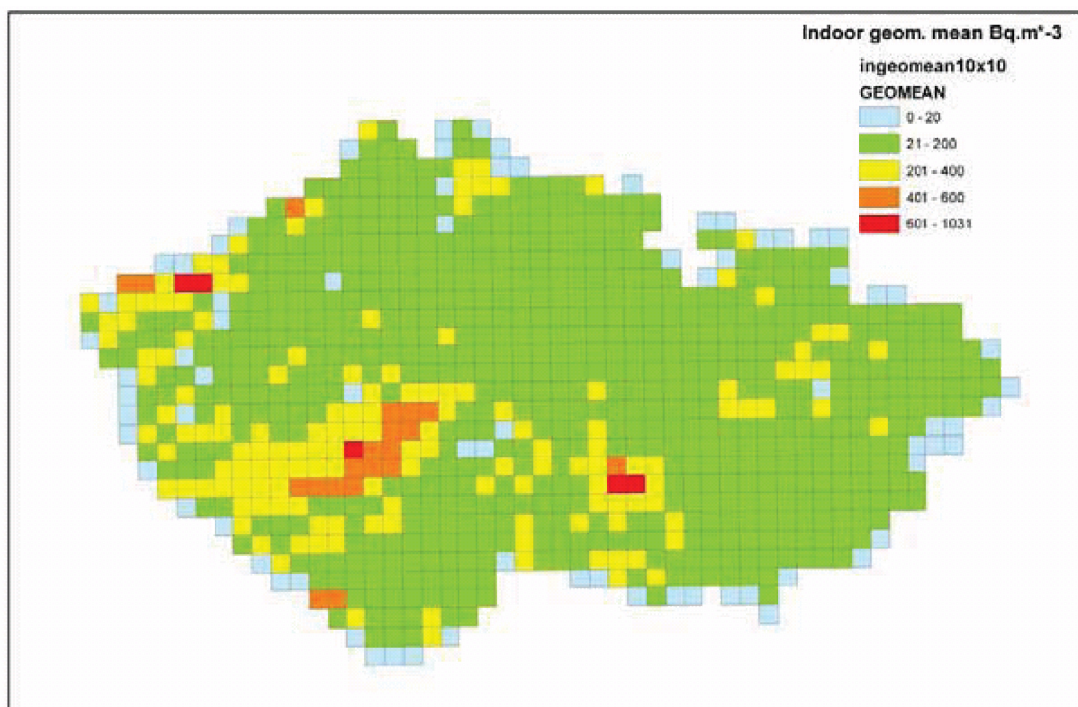


Рис. 569 – Пример гридинговой карты по данным радоновой съемки в Республике Чехия

Локальные средние величины основываются на сетке 10x10 [68]

Функция $\gamma(\rho_{ij})$ – экспериментальная (или модельная) вариограмма. Данная функция показывает общую изменчивость в данных в зависимости от расстояния.

Пример логнормального кригинга [78]. Вычислительная модель геогенического радонового потенциала включает декомпозицию пространственных компонент и факториальный кригинг (логнормальное шкалирование) данных радоновой съемки. Для выполнения геостатистического анализа порядок действий следующий. Выполняется логарифмическое преобразование концентраций радона. Определяется распределение множества данных приводится его моделирование вариограммами и кригингом.

Вариограмма позволяет рассчитать универсальность множества данных и их вариационную компоненту. Оценка вариабельности по рассматриваемому параметру на определенном расстоянии получается с вариограммы [136].

Модельные линии вариограмм могут быть подогнаны несколькими классами функций (сферические, экспоненциальные, степенные, логарифмические и др.).

По результатам определению содержания радона в почвенном воздухе на низкофоновом мониторинговом полигоне «Жуков Хутор» выполнено геостатистическое моделирование геогенического радонового потенциала. Полигон размещен в южной части Ирпень-Буча-Ворзельской рекреационной зоны. В административном отношении это Киево-Святошинский район – пригородная зона г. Киева. Измерения проведены по серии геофизических профилей с шагом съемки 5-10 м (рис. 70) с определением почвенного разреза, высоты местности, ландшафтных зон [40-42].

В результате гридинга, поверхность распределения концентраций радона в почвенном газе стала более гладкой и адекватной, без резких всплесков по краям изучаемой области. Кроме того, получены данные в междупрофильных областях, где данные отсутствовали или были представлены слабо.

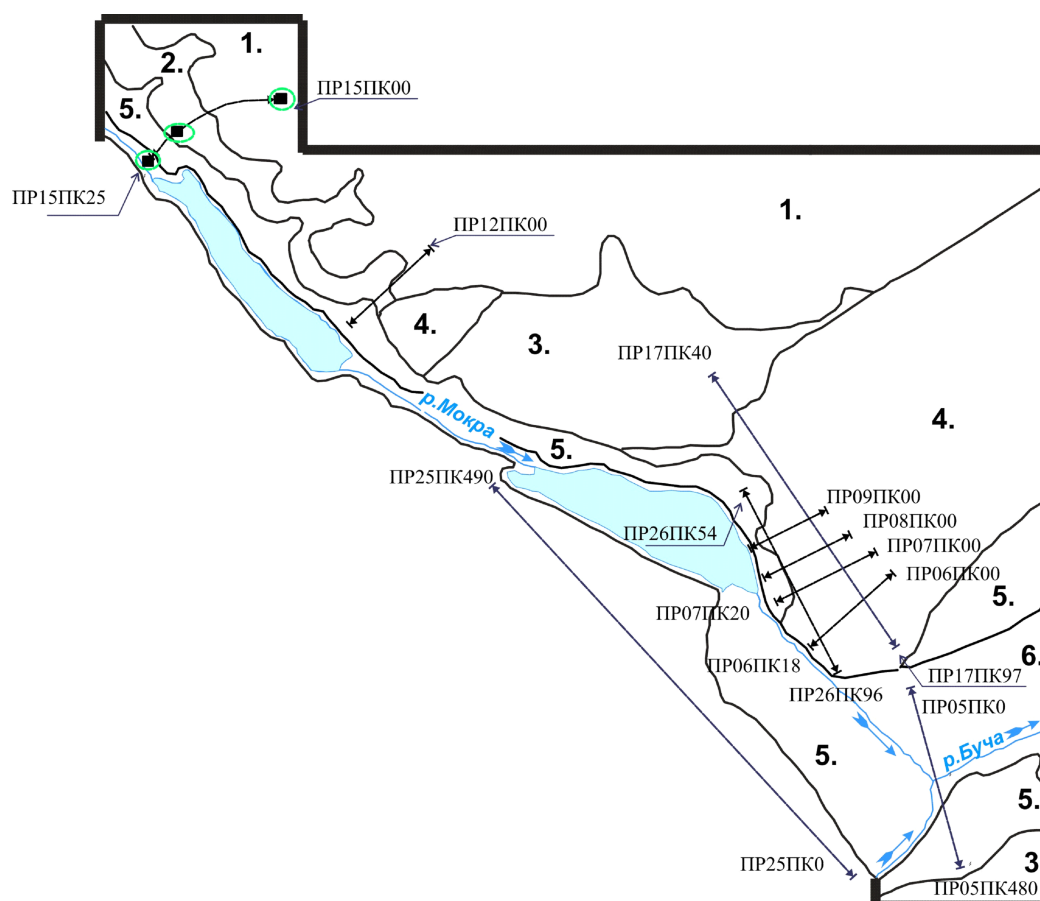


Рис. 70 – Профили эманационной съемки в части Ирпень-Буча-Ворзельской рекреационной зоны низкофоновый мониторинговый полигон «Жуков Хутор» (цифрами на карте показаны различные ландшафтные зоны)

Опираясь на описанные модели, концентрация радона в почвенном воздухе оценивалась с помощью методики логнормального кригинга. Оценки сделаны для узлов сетки 10x10 у.е. (1 у.е. \approx 10 м) (рис. 71). Модельное уравнение вариограммы имеет линейный вид и на расстоянии 30 условных единиц, вариабельность составляет 40%, $\gamma(30) \approx 0,4 =$ вариабельности.

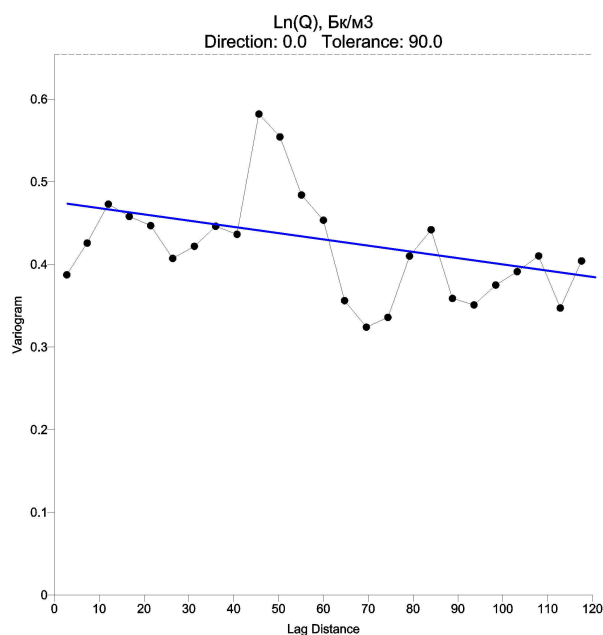


Рис. 71 – Вариограмма обработки логнормальным кригингом данных эманиционной съемки (низкофоновый мониторинговый полигон «Жуков Хутор»)

Анализ вариационной модели, проведенный методом фильтрации, позволил вычислить несколько ее составляющих.

1) *Основная пространственная структура* описываемая линейной моделью имеет небольшой наклон ($\text{slope}=0.00548$) при величине анизотропии 1,44 с ориентацией 150° . Была установлена универсальность для всех кластеров территории исследования, которая описывается величиной в 1960 Бк/м^3 . Эта величина радонового уровня отвечает слабоизменяемому уровню содержания радия (или урана) в верхнем слое почвы.

Крупномасштабное картирование геогенического радонового потенциала проведенного в Австрии выявило, что *nugget effect* связан с многокомпонентной вариабельностью между соседними измерениями (рис. 72).

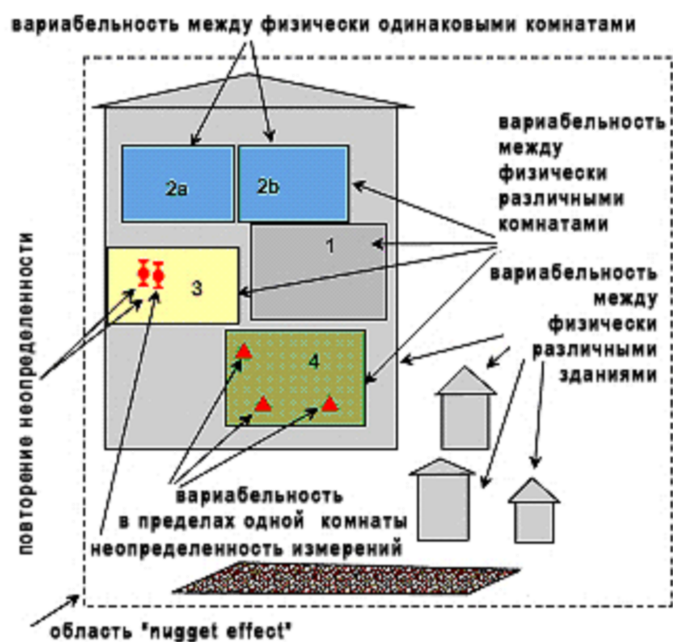


Рис. 72 – Структура ядерной составляющей "nugget effect" радонового потенциала [68]

При удалении этой ядерной компоненты из агрегированной выборки измерений получаем флуктуационную составляющую.

2) флуктуационная составляющая (*hot spots*) вариограммы описывается в основном несколькими вложенными разноразмерными экспоненциальными моделями.

- а) модель с диапазоном (40x60 координатных единицы);
- б) модель с диапазон (80 и 110 координатных единицы).

Модель 2а может соответствовать отображению среднего размера ландшафтных зон выделяемых на территории обследования. Ландшафтные зоны имеют различный геохимический профиль и могут выступать барьерами на пути миграции радия. В то же время модель 2б, скорее всего, имеет связь с крупными геоструктурными единицами полигона - участками наибольшего эрозионного вреза гидрографической сети. Ее изолинии оконтуривают участки наибольшего распространения овражно-балочной системы.

Пространственная декомпозиция данных эманационной съемки показала (после гридинга (рис. 73а)), что фильтрация универсальности (удаление распределение среднего содержания радона в почвенном воздухе) выявляет главную

пространственную структуру (рис. 73б) и две вложенные флуктуационные компоненты (рис. 73в).

Ядерная составляющая, описывающая поведение радона в воздухе помещения и зависит от крупномасштабных структур (геологической обстановки и особенностей почвы). Флуктуационная составляющая формируется привычками жителей и строительными характеристиками здания.

Способность геологических классов для регионального прогнозирования среднего геометрического радонового потенциала известно. Но, если геологические комплексы, выбранные для классификации слишком широки, вариабельность радонового потенциала в их пределах также будет большим и предсказание будет нести соответственно очень большую неопределенность. Во многих случаях распределение радонового потенциала в геологических комплексах слишком неоднородно чтобы точно подходить под логнормальное распределение, часто имеет сильные отклонения в области верхних хвостов распределения.

Компонента модели с размером 50 км все еще плохо интерпретируется, наибольшая вероятность связи ее с типом почвы. Компонента модели с линейной зависимостью (150 км) более четко проявлена - климатический фактор.

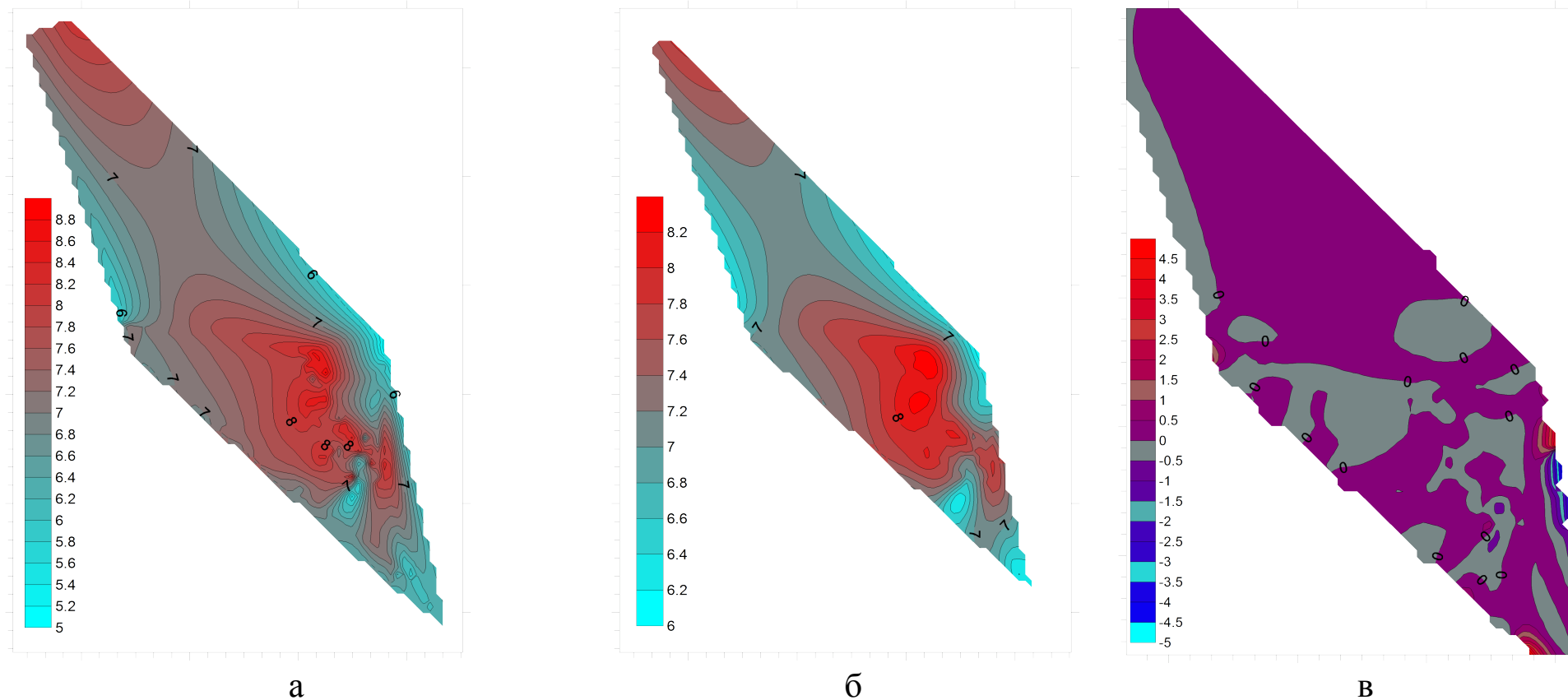


Рис. 73 – Пространственная декомпозиция данных эманацонной съемки (низкофонный мониторинговый полигон «Жуков Хутор»)

а) исходное поле радонового потенциала полученное в результате гридинга; обработка радонового потенциала логнормальным кригингом б) ядерная составляющая (универсальность), в) флуктуационная составляющая

Генерализация существующей геологической карты в различных масштабах производится путем комбинирования геологических комплексов под литостратиграфическим и радоновым аспектом как первичный шаг перед картированием радонового потенциала. Регионализация геогенического радонового потенциала оценивается за измеренными полевыми величинами с помощью пространственно-взвешенной интерполяции значений на узлах решетки, основанной на геологических комплексах. Каждый элемент решетки представляет собой область 3x3 км, которому присваивается серия атрибутов, таких как геологические характеристики, проницаемость почвы, активностная концентрация радона в почвенном газе и класс радонового потенциала. Решеточный элемент без измерений получает свою величину от ближайших точек измерений, лежащих на такой же геологической основе.

Пространственное распределение главных геологических комплексов положено в основу выбора представительных измерительных точек. Учитывая опытные точки, была разработана стандартная методика для оценки потенциала геогенического радона. В областях с однородным геологическим строением, плотность измеряющих точек низка. В Германии такого рода было 508 точек. Области с более сложной геологией и подозрением на высокий геогенический радоновый потенциал решетка опробования сгущалась (627 точек измерения). В геологически-однородных районах среднее расстояние между точками измерений составило приблизительно 25 км, в то время как тестовой области приблизительно 5 км. Подсчет суммы площадей с соответствующим радиусом вокруг каждой точки показал, что покрыто более 85% всей территории Германии.

Методика геоинформационной обработки данных радоновой съемки. Геологические карты оцифровываются с помощью дигитайзера и специализированных информационных продуктов (например, Arcview). Цифровая форма геологических карт состоит из двух слоев: 1) слой кривых, состоящий из линейных функций и 2) слой многоугольников, состоящий из геологических формаций. Каждый линейный объект и полигон имеет уникальный номер его привязки к базе данных. Блок-схема показывает анализ данных и интеграцию результатов (рис. 74).

Другим слоем базы данных является карта концентраций радона. Обычно это контурная карта, состоящая из ломаных линий. Они преобразуются, используя ГИС для пространственного анализа.

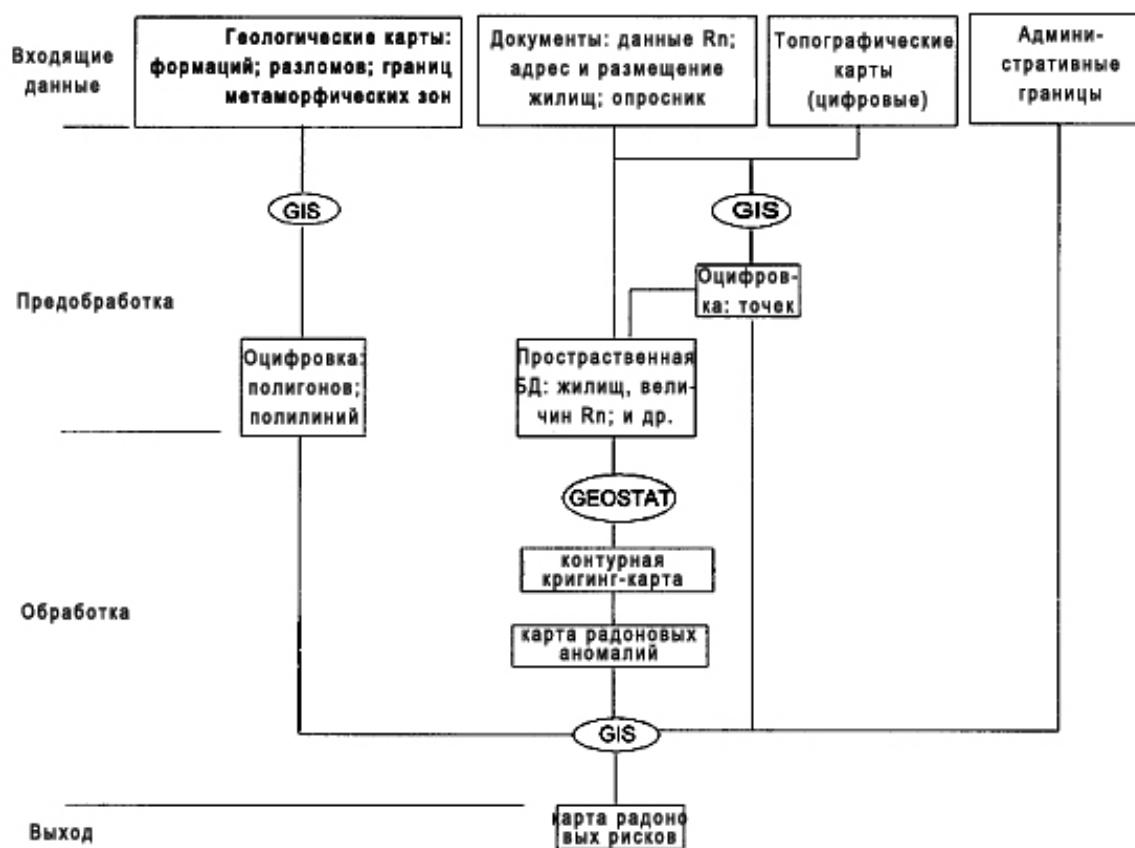


Рис. 74 – Схема иллюстрирующая анализ данных и методику интеграции данных [169]

7.6 Обобщенная схема получения радоновых рисков

Табл. 30 – Схема проведения оценки радонового риска

| Оценивание радонового риска | | |
|---|---|---|
| Необходимо определить | Способы определения | Методические особенности |
| Проницаемость и влажность почвы (и дренажного слоя в случае измерения возле строений) | По карте почв определяется типичные величины ее проницаемости | <ul style="list-style-type: none"> • измерение концентрации радона в почвенном воздухе в шпурах осуществляется на глубине 0,7-1 м или как можно глубже для избежание неопределенностей (вентиляция, локальная неоднородность верхнего покровного комплекса) |
| | Непосредственное определения (инструментальное или визуальное) проницаемости и влажности почв в точке измерения | |
| Концентрация радона в почвенном воздухе | Измеряется радиометрами радона непосредственно или опробованием по пробам воздуха | <ul style="list-style-type: none"> • проводить измерения концентраций радона в 2-6 точках на га • увеличивать количество точек измерений при неровностях грунта • точка измерения должна быть репрезентативной для данного участка местности |
| | Рассчитывается по содержанию радия/урана в грунте методом спектрометрии или аэрогаммаспектрометрии; или по карте коренных пород | |
| Концентрация радона в воде (подземных и поверхностных) | Измеряется радиометрами радона по пробам воды | <ul style="list-style-type: none"> • не проводить прямые измерения радона в дробленной породе или коренной породе, заменяя ее расчетными величинами • точка измерений: шурф глубиной 1 м (исследование почв) и |
| Концентрация радона в воздухе внутри помещений | Экспрессно измеряется радиометрами радона непосредственно или путем опробования. Экспрессно измеряется ЭРОА. | |
| | Интегрально измеряется радиометрами радона или детекторами радона | |
| Количество почвенного воздуха доступного для переноса | Качественно определяется по гранулометрическому составу грунта | |

| | | |
|--|----------------|---|
| Проницаемость фундамента здания | Опытные работы | прилегающие 2 шпура измерений ОАР почвенного воздуха |
| Разница давления воздуха внутри и снаружи здания | Измерение | |
| ↓ | | |
| Определение | | Способ |
| Область высокого радонового риска | | Популяционно- или территориально взвешенное усреднение на основе ГИС-технологий результатов эманационных исследований |
| Область потенциально радонового высокого риска | | |
| Область нормального радонового риска | | |
| Область низкого радонового риска | | |
| ↓ | | |
| Карта радоновых рисков | | |

классификация грунтов по радоновым рискам: низкорадоновые грунты (<10 кБк/м³); нормальнорадоновые грунты (10-50 кБк/м³); высокорадоновые грунты (>50 кБк/м³)

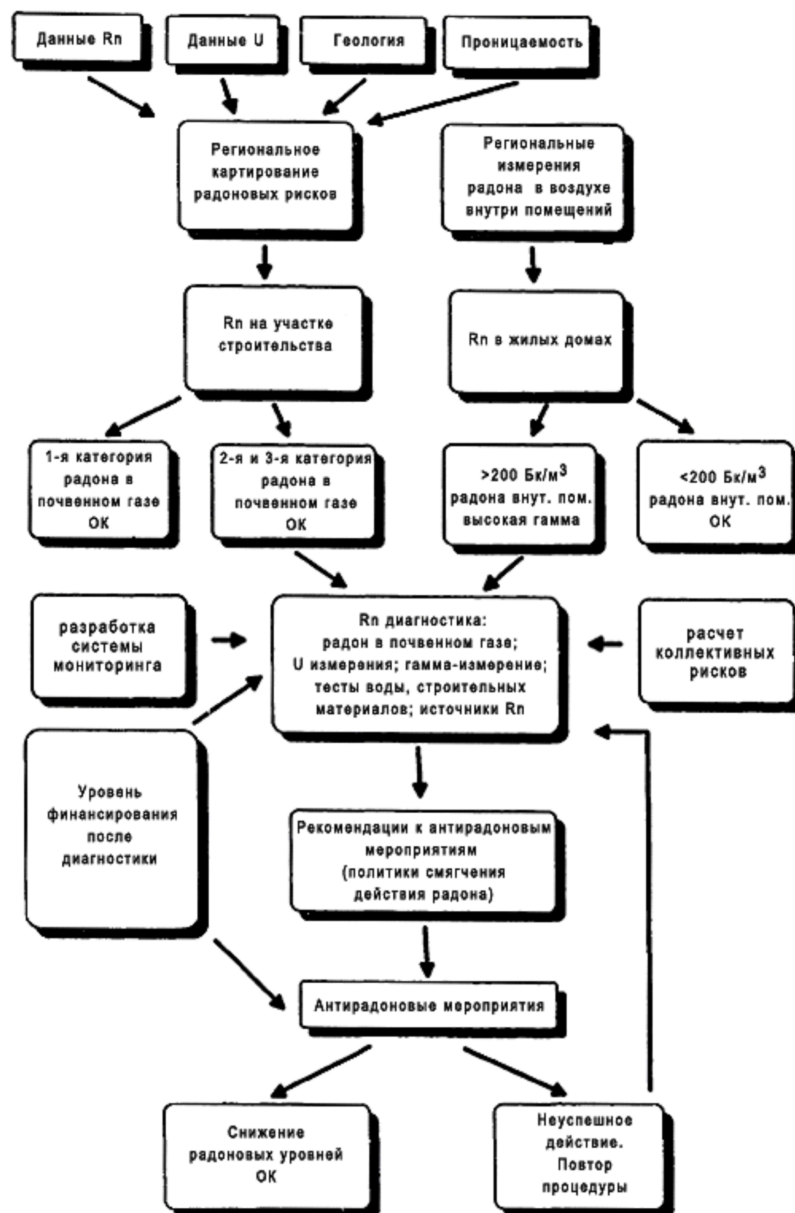


Рис. 75 –Схематическое изображение получения радоновых рисков [59]

Системы мониторинга радоноопасности населенных пунктов

- а) выбор типа детекторов и разработка оптимальных логистических схем их распределения и сбора;
- б) обработка данных с детекторов;
- в) систематизация данных и построение баз данных;
- г) анализ результатов;
- д) выводы и рекомендации.

Расчет коллективных рисков. расчет фактора коллективного риска CR(x):

$$CR(x) = RP(x) * f * n(x),$$

где RP – потенциальный радон;
 $n(x)$ – плотность населения (км⁻²).

$R = \int CR(x) dF$ - общий коллективный риск от радона в регионе на человека [35]

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдонин В.В. и др. Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых, М. Фонд «Мир» 2007.
2. Авдуалиев А.К., Войтов Г.И., Рудаков В.П. Радоновый предвестник некоторых сильных землетрясений Средней Азии // Докл. АН СССР. – 1986. –Т.291. - №4. – С.924-927.
3. Баранов В.И., Титаев Н.А. Радиогеология. – М. Из-во МГУ, 1973.
4. Барсуков В.Л., Варшал Г.М., Гаранин А.В., Замокина Н.С. Значение гидрогеохимических методов для краткосрочного прогноза землетрясений // Гидрогеохимические предвестники землетрясений. – М.: Наука, 1985. – С.3-16.
5. Бекман И.Н. Радон: враг, врач и помощник. Из-во МГУ, 2000, 205 с.
6. Бекман И.Н. Ядерная медицина (Курс лекций) М., МГУ, 2006.
7. Брунарски Л., Кравчик М. естественная радиоактивность строительных материалов // Бетон и железобетон. – 1990. - №7. – С.44-47.
8. Гудзенко В.В. О радий-радиевых методах оценки возраста молодых инфильтрационных вод // Исследование подземных вод изотопными методами. Сб. материалов. – М., 1981. – С.231-237.
9. Гудзенко В.В., Литвак Д.Р. О возможности оценки взаимосвязи водоносных горизонтов методами естественных радиоактивных изотопов (на примере района г. Киева) // материалы по геологии, гидрогеологии, геохимии, геофизике Украины и РСФСР. – К., 1977. – Вып. 13. – С. 68-71.
10. Гудзенко В.В., Шевченко О.Л. Вміст радону в підземних водах бюветів Києва // Экология и здоровье человека. Охрана водного и воздушного бассейнов. Утилизация отходов: Сб. материалов конф. – Харьков; Бердянск, 2003. – Т.4 – С.830-833.
11. Ермолов В.А. Геология. Часть II. Разведка и геологопромышленная оценка месторождений полезных ископаемых. М: МГГУ, 2005.

12. Железнова В.И., Шумилин И.П., Юфа Б.Я. Радиометрические методы анализа естественных радиоактивных элементов. Практическое руководство. Недра., М., 1968. 460 с.
13. Жуковский М.В. Расчет радиационных рисков при облучении дочерними продуктами распада радона // АНРИ. – 2001. - №1. – С.4-12.
14. Жуковский М.В., Ярмошенко И.В. Радон: измерение, дозы, оценка риска. Екатеринбург: УрОРАН, 1997.
15. Ивченко Г.И., Медведев Ю.И. Математическая статистика. – М.: Высшая школа, 1984. – 248 с.
16. Источники, эффекты и опасность ионизирующей радиации: Доклад научного комитета ООН по действию атомной радиации Генеральной Ассамблее за 1988 г. с приложениями: В2-х т.; Пер. с англ. М.: Мир, 1992.
17. Источники, эффекты и опасность ионизирующей радиации: Доклад научного комитета ООН по действию атомной радиации Генеральной Ассамблее за 2000 г. с приложениями: В2-х т.; Пер. с англ. М.: Мир, 2002.
18. Крисюк Э.М. Радиационный фон помещений. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 120 с.
19. Ларионов В.В., Резванов Р.А. Ядерная геофизика и радиохимическая разведка: Учебник для вузов. – 3-е изд. перераб. и доп. – М. Недра, 1988. -325 с.
20. Макаров В.И., Бабак В.И., Дорожко А.Л., Бондаренко В.М., Демин Н.В. Влияние структурно-геологических особенностей на распределение концентраций подпочвенного радона в подвалах жилых зданий (на примере района Чертаново г.Москвы) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2003. - №2. – С.139-152.
21. Методы поисков урановых месторождений. М. «Недра», 1969, 392 с.
22. Несмеянов Ан. Н., Баранов В.И., Заборенко К.Б., Руденко Н.П., Приселков Ю.А. Практическое руководство по радиохимии. ГНТИХЛ, М., 1956. 398 с.
23. Новиков Г.Ф., Капков Ю.Н. Радиоактивные методы разведки. М.: Недра, 1965. 750 с.
24. Новиков Г.Ф. Радиометрическая разведка. – Л., 1989.

25. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). – К.: МОЗ України, 1997. – 121 с.
26. Нормы радиационной безопасности НРБ-99 СП 2.6.1.758-99 РК.
27. Основные проблемы радоновой безопасности. Колл. авторов. Украинский научно-технологический центр, ИГОС НАН и МЧС Украины. К., 2005, с. 352
28. Основы геофизических методов: учебник для вузов / В.К. Хмелевской, В.И. Костицын; Перм. ун-т. – Пермь, 2010. – 400 с.
29. Павлов И.В. Математическая модель процесса эксгаляции радона с поверхности земли и критерии оценки потенциальной радоноопасности территории застройки // АНРИ. - №5(11). – 1997. – С.15-26.
30. Павлов И.В., Гулабянц Л.А., Иванов С.И., Охрименко С.Е., Маренный А.М. Задачи и методы радиационного контроля при строительстве зданий // АНРИ. - №3. – 2003.
31. Розанов Ю.А.. Теория вероятностей, случайные процессы и математическая статистика: Учебник для вузов. – М.: Наука, 1985. – 320 с.
32. Рудаков В.П. Динамика полей подпочвенного радона сейсмоактивных регионов СНГ: Автореф. дис.... доктора физ.-матем. наук. – М. ОИФЗ, 1992. – 56 с.
33. Рудаков В.П. Мониторинг напряженно-деформированного состояния пород сейсмоактивного региона эманационным методом // Геохимия – 1986. - №9. – С. 1337 – 1342.
34. Рыжакова Н.К., Яковлева В.С. Патент РФ №2212688 от 20.09.2003. Способ определения плотности потока с поверхности земли.
35. Справочник по прикладной статистике (под ред. Э.Ллойда, У.Ледермана). – М.: Финансы и статистика, 1990.
36. Справочное руководство гидрогеолога / Под. ред. проф. В.И. Максимова. В 2-х томах. Том 1. Изд. 3-е допл. и перераб., 1979, 519 с.
37. Стернглос Э. Дж. Радиоактивность. В кн. Химия окружающей среды. – Пер. с англ. / Под ред. А.П. Цыганкова. – М.: Химия, 1982. – 414 с.

38. Сыромятников Н.Г. Экологическая значимость содержания естественных радионуклидов в подземной воде районов рудных месторождений и населенных пунктов Казахстана // Геол. журн. Казахстана. – 2001. - №1. – С.73-79.
39. Глеубергенова Г. Определение отношения тория к урану в минералах и рудах при помощи толстослойных фотопластинок. Аналитическая химия, т. XIV, вып. 2., Изд. АН СССР, 1959.
40. Толстой М.І., Шабатура О.В., Бичок В.Д. Перспективи організації республіканського центру радонотерапії в Ірпінь-Ворзель-Бучанській рекреаційній зоні // Екологія довкілля та безпека життє-діяльності. №2, 2002, ст. 102 – 103.
41. Тютюнник Ю.Г., Шабатура О.В. Радономісткість підземних вод комунального та господарського використання у м. Ірпінь, смт Буча, смт Ворзель, смт Гостомель Київської області // Гідрологія, гідрохімія та гідроекологія. Вип. 5, 2003. С. 286 – 290.
42. Тютюнник Ю.Г., Шабатура О.В. Радон-222 у природних водах півдня Київського Полісся // Київський географічний щорічник. Науковий збірник. – Вип.2. – 2002. – К.: ВГЛ “Обрій”, 2003. – С. 128-133.
43. Уломов В.И., Мавашев Б.З. О предвестнике сильного тектонического землетрясения // Докл. АН ССР. – 1967. – Т.176. - №2. – С.319-329.
44. Федотов С.А., Чернышев С.Д., Матвиенко Ю.Д., Жаринов Н.А. Прогноз Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г., $M=7,8-7,9$, Камчатка, и его сильных афтершоков с $M \geq 6$ // Вулканология и сейсмология. – 1998. - №6. – С.3-16.
45. Филиппов Е.М. Ядерная разведка полезных ископаемых. Справочник., К., «Наукова думка», 1978, 588 с.
46. Фирстов П.П. Мониторинг объемной активности почвенного радона (^{222}Rn) на Паратунской геотермальной системе в 1997-1998 гг. с целью поиска предвестников сильных землетрясений Камчатки // Вулканология и сейсмология. – 1999. - №6. – С.1-11.
47. Фирстов П.П., Рудаков В.П. Результаты регистрации почвенного радона в 1997-200 гг. на Петропавловск-

Камчатском геодинамическом полигоне // Вулканология и сейсмология. – 2003. - №1. – С.26-41.

48. Фирстов П.П., Широков В.А., Руленко О.П., Яковлева В.С., Исаев А.В., Малышева О.П. О связи динамики подпочвенного радона (^{222}Rn) и водорода с сейсмической активностью Камчатки в июле - августе 2004 г. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 5. С. 49-59.

49. Фирстов П.П., Рудаков В.П. Результаты регистрации подпочвенного радона в 1997-2000 гг. на Петропавловск - Камчатском геодинамическом полигоне // Вулканология и сейсмология. 2003. № 1. С. 26-41.

50. Черник Д.А., Фоминых В.И., Венков В.А., Титов В.К. Экспресс-метод для измерений эквивалентной равновесной объемной активности радона // Рос. геофиз. журн. – 1993. - № 3-4. – С. 85-88.

51. Яковлева В.С., Каратаев В.Д. Плотность потока радона с поверхности земли как возможный индикатор изменений напряженно-деформированного состояния геологической среды // Вулканология и сейсмология. 2007. № 1. С. 74-77.

52. Ярмошенко И.В., Жуковський М.В., Екидин А.Л. Моделирование поступления радона в жилища // АНРИ. – 1999. - №4. – С.17-26

53. Abu-Jarad, F. and Fremlin, J.H., 1983: The indoor concentration of radon daughters in three different areas of U.K. Health Physics Vol. 44, No.5, 1983, pp. 479-485.

54. Akerblom, G. and Wilson, C., 1981: Radon - Geological aspects of an environmental problem. Geological Survey of Sweden. Rapport och meddelande nr 30, 1982. Uppsala, Sweden. 47pp. ISBN 91-7158-271-1.

55. Alter, H.W. and Fleischer, R.L., 1981: Passive integrating radon monitor for environmental monitoring. Health Physics. Vol. 40, May 1981, pp.693-702.

56. Altshuler, B. and Pasternack, B., 1963, *Statistical Measures of the Lower Limit of Detection of a Radioactivity Counter*, Health Physics, Vol. 9, pp. 293-298.

57. American Association of Radon Scientists and Technologists (AARST), 1991, *Draft Standard: Radon/Radon Decay*

Product Instrumentation Test and Calibration, AARST, Park Ridge, New Jersey.

58. American National Standards Institute (ANSI), 1989, *Performance Specifications for Health Physics Instrumentation-Occupational Airborne Radioactivity Monitoring Instrumentation*, ANSI N42.17B-1989.

59. Barnet I, Miksova J, Prochazka J. Radon database and radon risk map 1 : 500.000 of the Czech Republic. In: Barnet I, Neznal M, editors. Radon investigations in Czech Republic VII and the fourth International Workshop on the Geological aspects of radon risk mapping, Prague, Czech Rep., 1998; 1-5.

60. Bodansky D, Robkin MA, and Stadler DR. (1987). Editors. *Indoor Radon and Its Hazards*. Univ. of Washington Press.

61. Bruno RC. (1983). Sources of indoor radon in houses: A review. *J. Air Pollu. Contr. Assoc.* 133, 105.

62. Chamber DB, Reilly PM, Lowe LM, Stager RH, and Dupont P. (1992). Effects of exposure uncertainty on estimation of radon risks. In Cross, p. 987-1012.

63. Chapin, Jr., F.S., 1974, *Human Activity Patterns in the City: Things People Do in Time and Space*, John Wiley and Sons, New York, NY.

64. Clavensj, B., Akerblom, G. and Andersson P., 1983: Radon in dwellings. The effect of the ground on the concentration of radon and gamma radiation indoors. Statens rad för byggnadsforskning. Report R9:1983 (in Swedish), Stockholm. 442 pp. ISBN 91-540-3866-9.

65. Cross FT. (1992). Ed. *Indoor Radon and Lung Cancer: Reality or Myth*. Twenty-ninth Hanford Symposium on Health and the Environment. Batelle Press, Columbus (Parts 1 and 2).

66. Cross FT. (1992). Ed. *Indoor Radon and Lung Cancer: Reality or Myth*. Twenty-ninth Hanford Symposium on Health and the Environment. Batelle Press, Columbus (Parts 2 and 2).

67. Dubinchuk V.T. Radon as a precursor of earthquakes. // *Isotopic geochemical precursors of earthquakes and volcanic eruption*. Vienna, 1991. P. 6-22.

68. DOE (1988). *Radon Epidemiology. A Guide to the Literature*. Literature Survey Series. U.S. Department of Energy, Office of Energy Research, DOE/ER-0399.

69. Dubois G (2005). *An overview of radon surveys in Europe*. European Commission report (EUR 21892 EN), (<http://radonmapping.jrc.it>).
70. Dudney, C.S., Hawthorne, A.R., Wallace, R.G., and Reed, R.P., 1990, *Radon-222, Rn-222 Progeny and Rn-222 Progeny Levels in 70 Houses*, Health Physics, Vol. 58, No. 3, pp. 297-311.
71. Effects of Ionising Radiation. UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly. United Nations, New York.
72. EPA (1992c) Technical support document for the 1992 citizen's guide to radon. EPA 400-R-92-011, May 1992.
73. EPA (1992d) Radon prevention in the design and construction of schools and other large buildings. EPA/625/R-92/016.
74. European Commission Contract (FIRI-CT-2001-20142), (www.rpii.ie/reports).
75. European Radon Research and Industry Collaborative Concerted Action (ERRICCA 2).
76. Fennell SG et al. (2002). *Radon in Dwellings*. Radiological Protection Institute of Ireland The Irish National Radon Survey (Report RPII-02/1).
77. Fleischer, R.L. and Turner, L.G., 1984, *Indoor Radon Measurements in the New York Capital District*, Health Physics, Vol. 46, pp. 999-1011.
78. Friedmann H (2005). Final results of the Austrian radon Project. *Health Phys*, 89(4):339-348.
79. Furrer, D., Cramer, R., and Burkart, W., 1991, *Dynamics of Rn Transport From the Cellar to the Living Area in an Unheated House*, Health Physics, Vol. 60, No. 3, pp. 393-398.
80. George, A.C., Duncan, M., and Franklin, H., 1984, *Measurements of Radon in Residential Buildings in Maryland and Pennsylvania*, Radiat. Prot. Dosim., Vol. 7, pp. 291-294.
81. Gesell, T.F., 1983, *Background Atmospheric Rn-222 Concentrations Outdoors and Indoors: A Review*, Health Physics, Vol. 45, pp. 289-302.
82. Goldin, A.S., 1984, *Evaluation of Internal Quality Control Measurements and Radioassay*, Health Physics, Vol. 47, No. 3, pp. 361-364.

83. Gray A et al. (2009). Lung cancer deaths from indoor radon and the cost effectiveness and potential of policies to reduce them. *BMJ*, 338: a3110.
84. Gunby JA, Darby SC, Miles JCH, Green BMR, Cox DR. Factors affecting indoor radon concentrations in the United Kingdom. *Health Phys.* 1993; 64, 1: 2-12.
85. Gundersen LCS, Reimer GM, Wiggs CR, Rice CA. Map showing radon potential of rocks and soils in Montgomery County, Maryland (1 : 62 500). U.S. Geol. Surv., Miscellaneous Field Studies Map MF-2043, 1988.
86. Günther Just, Jürgen Petzold. Radon and its balneological usage in the German Spa Center Weissenstadt (Bavaria) inside the granitic rock areas of the Fichtelgebirge Mountains. X. International conference Innovation technologies and world tendencies of development of medical rehabilitation, physiotherapy and health-resort treatment 16-17 December 2010 Clinical health-resort „Zhovten“, Ukraine, Kiev, Koncha-Zaspa.
87. Gunderson LCS. (1992). Role of geology in predicting radon potential. *Health Phys* 62(6):S13 (Supplement).
88. Harley, N.H., 1991, *Radon Levels in a High-Rise Apartment*, *Health Physics*, Vol. 61, No. 2, pp. 263-265.
89. Hess, C.T., 1985, *Field and Laboratory Tests of Etched Track Detectors for Rn-222: Summer – vs –Winter Variations and Tightness Effects in Maine Houses*, *Health Physics*, Vol. 49, pp. 65-79.
90. Hulka J, Barnet I, Burian I. The relationship between indoor radon and data from regional risk maps in the eastern Bohemian districts, Czech Republic. In: Barnet I, Neznal M, editors. *Radon investigations in Czech Republic V and the 2 nd International Workshop on the Geological aspects of radon risk mapping*, Prague, Czech Rep., 1994; 48-54.
91. Iglewicz, B. and Myers, R.H., February 1970, *Comparison of Approximations to the Percentage Points of the Sample Coefficients of Variation*, *Technometrics*, Vol. 12, No. 1, pp. 166-170.
92. International Agency for Research on Cancer (2004). *Tobacco Smoke and Involuntary Smoking*. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 83, IARC, Lyon.

93. International Commission on Radiological Protection (1994). *Protection against radon-222 at home and at work*. ICRP Publication 65. Oxford: Pergamon Press.
94. International Commission on Radiological Protection (2008). *Recommendations of the ICRP*. ICRP Publication 103. Elsevier.
95. Johnson RH Jr. (1992). Radon health risk communication--a new approach to motivate home owners in the 1990s. *Health Phys* 62(6):S26 (Supplement).
96. Keller, G., Folkerts, K.H., and Muth, H., 1984, *Special Aspects of the Rn-222 and Daughter Product Concentrations in Dwellings and the Open Air*, *Radiat. Prot. Dosim.*, Vol. 7, pp. 151-154.
97. Kemski J., Klingel R, Siehl A. Classification and mapping of radon affected areas in Germany.- *Environm. Int.* 1996b; 22, 1: 789-798.
98. Kemski J., Klingel R, Siehl A. Geogene Faktoren der Strahlenexposition unter besonderer Berücksichtigung des Radon-Potentials (Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben St. Sch. 4062). Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMU-1996-470 1996c, 76 pp.
99. Kemski J., Klingel R, Siehl A. Towards a classification of radon prone areas in Germany. In: Barnet I, Neznal M, editors. *Radon investigations in Czech Republic V and the 2nd International Workshop on the Geological aspects of radon risk mapping*, Prague, Czech Rep., 1994; 101-109.
100. Kemski J., Klingel R, Siehl, A. Das geogene Radon-Potential. In: Siehl A, editor: *Umweltradioaktivität*. Ernst & Sohn, Berlin, 1996a, pp. 179-222.
101. Kemski J., Siehl A, Stegemann R, Valdivia-Manchego M. Mapping the geogenic radon potential in Germany using GIS-techniques. In: Barnet I, Neznal M, editors. *Radon investigations in Czech Republic VII and the fourth International Workshop on the Geological aspects of radon risk mapping*. Prague, Czech Rep., 1998; 45-52.
102. Kemski J, Siehl A, Valdivia-Manchego M, Lehmann R. Comparison of radon concentrations in buildings in Oberfranken (Bavaria) with the geogenic radon potential. In: Barnet I, Neznal M,

editors. Radon investigations in Czech Republic VII and the fourth International Workshop on the Geological aspects of radon risk mapping, Prague, Czech Rep., 1998; 53-62.

103. Kemski J, Siehl A, Valdivia-Manchego M. Klassifikation des geogenen Radon-Potentials in der Bundesrepublik Deutschland. In: SSK, editor. Radon-Statusgespräch 1998, Neuherberg, 18./19. Mai 1998. Festveranstaltung zum 70. Geburtstag von Prof. Dr. W. Jacobi.- Berichte der Strahlenschutzkommission (SSK) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 1998; 17: 13-24.

104. Kies A, Feider M, Biell A, Rowlinson L. Radon mapping in the Grand-Duchy of Luxembourg. In: Barnet I, Neznal M, editors. Radon investigations in the Czech Republic V and the 2nd International Workshop on the Geological aspects of radon risk mapping, Prague, Czech Rep., 1994; 91-100.

105. Klingel R, Siehl A. Das Radon-Risiko aus geologischer Sicht. In: Winter M, Wicke A, editors. Umweltradioaktivität - Radioökologie - Strahlenwirkungen.- Fortschritte im Strahlenschutz 1993; FS-93-67-T: 99-105.

106. Kreienbrock L, Siehl A. Multiple statistische Analyse von Radon-Ehebungsmessungen in Deutschland. In: Siehl A, editor. Umweltradioaktivität. Ernst & Sohn, Berlin, 1996, pp. 299-310.

107. Kunsch B., Steger F. Die Vomorm "Radioaktivität in Baustoffen" // Zement und Beton. – 1987. - №94/ - P.152-154

108. Lapp RE. (1990). Radon Health Effects? Health Physics Society's Newsletter, p. 1-5, Jan. 1990.

109. Lehmann R, Kemski J, Siehl A, Stegemann R. Approach to identification of radon areas in Germany. (this vol.).

110. Lehmann R, Kemski J, Valdivia-Manchego M, Siehl A. Messungen der Radonkonzentration in Gebäuden Oberfrankens. BfS-Bericht, ST 1-02/1998, 1998; 7 pp.

111. Letourneau E., et al. (1983). Lung cancer mortality and indoor radon concentrations in 18 Canadian cities. 16th Midyear Topical Meeting, Epidemiology Applied to Health Physics, Albuquerque, New Mexico.

112. Lubin JH., (1993). Personal communication. Epidemiologic investigation of radiological effects in high background areas of

YandJiang. China. Journal of Radiation Research (Japan) 31(1):119-136.

113. Martz, D.E., Rood, A.S., George, J.L., Pearson, M.D., and Langner, Jr., G.H., 1991, *Year-to-Year Variations in Annual Average Indoor Rn-222 Concentrations*, Health Physics, Vol. 61, No. 3, pp. 409-413.

114. Miles JC (1998) Mapping radon prone areas by log-normal modeling of house data. *Health Phys*, 74(3):370-378.

115. Miles JC et al. (2007). *Indicative Atlas of Radon in England and Wales*. Health Protection Agency. HPA-RPD-033.

116. Moeller, D. Harvard University, School of Public Health. Presentation made at April, 1993 Annual Meeting of the NCRP.

117. Moeller, D.W. and Underhill, D.W., December 1976, *Final Report on Study of the Effects of Building Materials on Population Dose Equivalent*, School of Public Health, Harvard University, Boston, MA.

118. Mogro-Compero A., Fleischer R.J. Lakes R.S. Changes in subsurface radon concentration associated with earthquakes // J.G.R. – 1980. – V.85. – P. 3053-3057.

119. NAS (1991). Comparative dosimetry of radon in mines and homes. Companion to Health risks of radon and other internationally deposited alpha-emitters. Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations- BEIR IV. National Research Council, National Academy of Sciences Press, Washington, DC.

120. NAS-BEIR IV (1988). Health risks of radon and other internationally deposited alpha-emitters. Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations. National Research Council, National Academy of Sciences Press, Washington, DC.

121. NCRP (1975). Report No. 45. Natural background radiation in the United States.

122. NCRP (1984). Report No. 44. Exposures from the uranium series with emphasis on radon and its daughters.

123. NCRP (1989). Report No. 103. Control of radon in houses.

124. NCRP Commentary No. 6 (1991). Radon exposure of the U.S. population--status of the problem.

125. Neznal M, Neznal M, Barnet I. Testing of regional radon risk maps reliability. In: Barnet I, editor. Radon investigations in the Czech Republic IV 1993; 12-17.

126. Neznal M, Neznal M, Smarda J. Detailed radon risk mapping in the Neratovice and Melnik area (central Bohemia). In: Barnett I, editor: Radon investigations in the Czech Republic IV 1993; pp. 42-47.
127. Nyberg, P.C. and Bernhardt, D.E., 1983, *Measurement of Time-Integrated Radon Concentrations in Residences*, Health Physics, Vol. 45, pp. 539-543.
128. Otton J.K., Nielson K.K. et al, Quantitative modelling of Radon potential in Florida and the use of aeroradiometric data, 1996.
129. Pasternack, B.S. and Harley, N.H., 1971, *Detection Limits for Radionuclides in the Analysis of MultiComponent Gamma Ray Spectrometer Data*, Nuclear Instr. and Methods, Vol. 91, pp. 533-540.
130. Perritt, R.L., Hartwell, T.D., Sheldon, L.S., Cox, B.G., Clayton, C.A., Jones, S.M., and Smith, M.L., 1990, *Radon-222 Levels in New York State Homes*, Health Physics, Vol. 58, No. 2, pp. 147-155.
131. Postendorfer J., Butterweck G. and Reineking A. Daily variation of the radon concentration indoors and outdoors and the influence of meteorological parameters // Health Phys. – 1994.
132. Put L.W. and de Meijer, R.J., 1988, *Variation of Time-Averaged Indoor and Outdoor Radon Concentrations with Time, Location and Sampling Height*, Radiat. Prot. Dosim., Vol. 24, No. 1/4, pp. 317-320.
133. *Radon*, EPA 402-K-92-001, Washington, D.C. U.S. Environmental Protection Agency, 1992b, *Consumer's Guide to Radon Reduction*, EPA 402-K-92-003, Office of Air and Radiation, Washington, D.C.
134. Radon in Dwellings - The Irish National Radon Survey. RPII 02/1, 2002.
135. Research and Industry Collaborative Concerted Action (ERRICCA2), European Commission Contract (FIRI-CT-2001-20142), (www.rpii.ie/reports).
136. Ronca-Battista, M. and Magno, P., 1988, *A Comparison of the Variability of Different Techniques and Sampling Periods for Measuring Rn-222 and its Decay Products*, Health Physics, Vol. 55, No. 5, pp. 801-807.

137. Schroeder G.L., Kraner H.W., Evans R.D. Diffusion of radon in several naturally occurring soil types // J.G.R. – 1965. - V.70. - P.471-474.
138. Schumann, RR (ed.). Geologic radon potential of EPA region 5, Illinois, Indiana, Michigan, Minnesota, Ohio, and Wisconsin.- U.S. Geol. Surv., Open-file Rep. 93-292-E, 1993, 194 pp.
139. Seminars in Nuclear Medicine (1988). Nuclear Medicine and the Environment. Vol. 18, No. 1, Part III. Guest Editor, WR Hendee, Grune & Stratton.
140. *Sources and Effects of Ionising Radiation*. UNSCEAR Report to the General Assembly. United Nations, New York.
141. Steck, D.J., 1992, *Spatial and Temporal Indoor Radon Concentrations*, Health Physics, Vol. 62, No. 4, pp. 351-355.
142. Strahlenschutzkommission. Strahlenschutzgrundsätze zur Begrenzung der Strahlenexposition durch Radon und seine Zerfallsprodukte in Gebäuden. Empfehlung der Strahlenschutzkommission. Bundesanzeiger Nr. 155, 1993.
143. Stranden, E., Berteig, L., and Ugletveit, F., 1979, *A Study on Radon in Dwellings*, Health Physics, Vol. 36, pp. 413-421.
144. Synnott H, Fenton D (2005a). *An evaluation of radon mapping techniques in Europe*.
145. Synnott H, Fenton D (2005b). *An evaluation of radon Reference Levels and radon measurement techniques and protocols in European countries*. European Radon.
146. Szalai, A., 1972, *The Use of Time: Daily Activities of Urban and Suburban Populations in Twelve Countries*, Mouton, The Hague, Paris.
147. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, New York. Arvela, H., Voutilainen, A., Makelainen, I., Castren, O., and Winqvist, K., 1988, *Comparison of Predicted and Measured Variations of Indoor Radon Concentration*, Radiat. Prot. Dosim., Vol. 24, No. 1/4, pp. 231-235.
148. Virk H. S., Baljinder S. Radon anomalies in soil-gas and groundwater as earthquake precursor phenomena. // Tectonophysics. V. 227. 1993. P. 215–224.
149. U.S. Department of Energy, 1990, *Procedures Manual*, U.S. DOE Environmental Measurements Laboratory, 376 Hudson Street, N.Y., N.Y. 10014-3621 (HASL-300).

150. U.S. Environmental Protection Agency, 1980, *Interim Guidelines and Specifications for Preparing Quality Assurance Project Plans*, QAMS-005/80, Office of Monitoring Systems and Quality Assurance, Office of Research and Development, Washington, D.C.

151. U.S. Environmental Protection Agency, 1987, *Interim Protocols for Screening and Follow-up Radon and Radon Decay Product Measurements*, EPA 520/1-86-014-1, Office of Radiation Programs, Washington, D.C.

152. U.S. Environmental Protection Agency, 1991, *Radon Measurement Proficiency (RMP) Program Handbook*, EPA 520/1-91-006, Office of Radiation Programs, Washington, D.C.

153. U.S. Environmental Protection Agency, 1992c, *Indoor Radon and Radon Decay Product Measurement Device Protocols*, EPA 520-402-R-92-004, Office of Radiation Programs, Washington, D.C.

154. U.S. Environmental Protection Agency, 1992d, *Interim Radon Mitigation Standards*, Office of Radiation Programs, Washington, D.C.

155. U.S. Environmental Protection Agency, 1992e, *National Radon Measurement Proficiency Program, National Proficiency Report*, EPA 520/1-91-014-3N, Office of Air and Radiation, Washington, D.C.

156. U.S. Environmental Protection Agency, 1992f, *Radon Contractor Proficiency (RCP) Program Application Information Packet*, EPA 402-K-92-001, Washington, D.C.

157. U.S. Environmental Protection Agency, 1992g, *Technical Support Document for the 1992. Citizen's Guide to Radon*, EPA 400-R-92-011, Office of Air and Radiation, Washington, D.C.

158. U.S. Environmental Protection Agency, 1993, *Home Buyer's and Seller's Guide to Radon*, EPA 402-R-93-003, Office of Radiation Programs, Washington, D.C.

159. U.S. Environmental Protection Agency, December 1984, *Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems: Volume 1*, EPA 600/9-76-005, Washington, D.C.

160. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Radiation Programs; U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control, 1992a, *A Citizen's Guide*.

161. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2000).
162. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2008).
163. United States Environmental Protection Agency (1992). *Technical Support Document for the 1992 Citizen's Guide to Radon*, USEPA Publication 400-R-011, Washington, D.C.
164. United States Environmental Protection Agency (1993). *Map of Radon Zones*. USEPA Publication 402-F-93-013, Washington, D.C.
165. Wilkening, M. and Wicke, A., 1986, *Seasonal Variations of Indoor Rn at a Location in the Southwestern United States*, Health Physics, Vol. 51, pp. 427-436.
166. Wilson, D.L., Gammage, R.B., Dudney, C.S., and Saultz, R.J., 1991, *Summertime Elevation of Rn-222 Levels in Huntsville, Alabama*, Health Physics, Vol. 60, No. 3, pp. 393-398.
167. World Health Organization (2007). *International Radon Project Survey on Radon Guidelines, Programmes and Activities*. WHO, Geneva.
168. World Health Organization (2008). WHO Report on the Global Tobacco Epidemic -The MPOWER package. WHO, Geneva.
169. H.C. Zhua, J.M. Charleta, A. Poffijnb. Radon risk mapping in southern Belgium: an application of geostatistical and GIS techniques. *The Science of the Total Environment* 272 2001 203/210.

Полезные ссылки

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2000.
American Lung Cancer Association
http://www.lungusa.org/air/radon_factsheet99.html
- Building Research Establishment, Foundation for the Built Environment, UK www.bre.co.uk
- Cohen BL (1987) Reducing hazards of nuclear power insanity in action. *Physics and Society*. 16: (3), 2-4.
- Cohen BL (1993) Relationship between exposure to radon and various types of cancer. *Health Physics Journal* 65:234-251
- Cohen BL. (1992). Multi-stratified multiple regression tests of the linear/no-threshold theory of radon-induced lung cancer. In Cross, p. 959-975.
- Cornelis J, Landsheere C, Poffijn A and Vanmarcke H. (1992). Experimental and theoretical study of the fraction of Po-210 absorbed in glass. In Cross, p. 101-111.
- Cothern CR, and Smith JE, Jr. (1987). Ed. *Environmental Radon*. Environmental Science Research Series. Vol. 35, Plenum Press, NY, and London. Department of the Environment and Local Government, 2004.
- DOE (1990). *Indoor Radon and Decay Products: Concentrations, Causes, and Control Strategies*. Technical Report Series. DOE/ER-0480P.
- DOE (1991). Department of Energy, OER. Report on the Second International Workshop on Residential Radon. CONF-9107220.
- DOE (1993). Radon Research Program, FY 1992. DOE/ER-0588 April, 1993. U.S. Dept. of Energy, Office of Health and Environmental Research, Washington, DC 20585.
- DSMA ATCON Ltd. (Dilworth, Secord, Meagher and Associates Limited), 1979: Variation of radon concentration in soil gas. Atomic Energy Control Board, Canada. Report 6, June 1979.
- DSMA ATCON Ltd. (Dilworth, Secord, Meagher and Associates Limited), 1981: Groundwater investigation. Development program for radiation reduction. Atomic Energy Control Board, Canada. Report 12, February 1981.
- DSMA ATCON Ltd. (Dilworth, Secord, Meagher and Associates limited), 1981: Report on investigation and implementation of

remedial measures for the radiation reduction and radioactive decontamination of Elliot lake, Ontario. Atomic Energy Control Board, Canada. February 1981.

Edelstein, Michael R., William J. Makofske. Radon's deadly daughters: science, environmental policy, and the politics of risk. Rowman & Littlefield, 1998, pp. 36–39 ISBN 0847683346.

Ennomoser O., Ambach W, Brunner P, Schneider P, Oberaigner W. (1993). High domestic and occupational radon exposures: a comparison. *Lancet* 342: July 3, 1993, 47.

EPA (1987). Radon Reduction Methods, A Homeowner's Guide (2nd edition). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.

EPA (1992a) A citizen's guide to radon (second edition) The guide to protecting yourself and your family from radon. ANR-464, May 1992.

EPA (1992b) Consumer's guide to radon reduction. 402-K92-003. August 1992

EPA (1992c) Technical support document for the 1992 citizen's guide to radon. EPA 400-R-92-011, May 1992.

Health Canada: Radon <http://www.hc-sc.gc.ca/ehp/ehd/catalogue/general/iyh/radon.htm>

Hess, C.T., Weiffenbach, C.V. and Norton, S.A., 1982: Variations of airborne and waterborne Rn-222 in houses in Maine. *Environment International*, Vol. 7, 1982.

Home Buyer's and Seller's Guide to Radon (<http://www.nachi.org/radon.htm>) An article by the International Association of Certified Home Inspectors (InterNACHI).

ICRP 60 (1991). Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Pergamon Press, NY.

Laurer, GR, Gang QT, Lubin JH, Li J-Y, Cai SK, Yao, SX, Chen ZJ. Hou Y, Guo WD, and Blot WJ. Skeletal Pb-210 levels and lung cancer among radon-exposed tin miners in southern china. *Health Phys.* (1993) 64: 253-259

Letourneau E., (1983). Lung cancer mortality and indoor radon concentrations in 18 Canadian cities. 16th Midyear Meeting, HPS

Lively, RS, and Steck, DJ. (1993). Long-term radon concentrations estimated from Po-210 embedded in glass. *Health Phys* 64: 485-490.

Lubin JH. and Boice JD. (1989). Estimating Rn-induced lung cancer in the United States. *Health Phys* 7:417-427.

Maclaren, James F, limited, 1979: Report on investigation and implementation of remedial measures for the reduction of radioactivity found in Bancroft, Ontario, and its environs. The Atomic Energy Control Board, Canada. February 1979.

Map referring to radon concentrations in England and Wales (<http://www.ukradon.org/article>).

Marcinowski F. (1992). Nationwide survey of residential radon levels in the U.S. *Health Phys* 62(6):S13 (Supplement).

NAS (1991). Comparative dosimetry of radon in mines and homes. Companion to Health risks of radon and other internationally deposited alpha-emitters. Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations- BEIR IV. National Research Council, National Academy of Sciences Press, Washington, DC.

NAS-BEIR IV (1988). Health risks of radon and other internationally deposited alpha-emitters. Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations. National Research Council, National Academy of Sciences Press, Washington, DC.

NAS-BEIR V (1990). Health effects of exposure to low levels of ionizing radiation. Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations. National Research Council, National Academy of Sciences Press, Washington, DC.

NCRP (1984). Report No. 78. Evaluation of occupational and environmental exposures to radon and radon daughters in the United States.

NCRP (1987). Report No. 93. Ionizing radiation exposure of the population of the United States.

NCRP (1988). Proceedings of the 24th Annual Meeting of the NCRP. Radon.

NCRP (1988). Report No. 97. Measurement of radon and radon daughters in air.

NCRP (1989). Report No. 100. Exposure of the U.S. population to diagnostic medical radiation.

NCRP (1989). Report No. 103. Control of radon in houses.

NCRP (1993). Report No. 116. Limitation of exposure to ionizing radiation.

NCRP Commentary No. 6 (1991). Radon exposure of the U.S. population--status of the problem.

Nero AV, Schwehr MB, Nazaroff WW and Revzan KL (1986) Distribution of airborne radon-222 concentrations in U.S. homes. *Science* 234: 992-997.

Neuberger JS. (1991). Residential radon exposure and lung cancer: an overview of published studies. *Cancer Detect. prev.* 15:435-443.

Neuberger JS. (1992). Residential radon exposure and lung cancer: an overview of ongoing studies. *Health Physics* 63(5):503-509.

Numerous references, see for instance Analysis And Modelling Of Indoor Radon Distributions Using Extreme Values Theory (<http://www.geology.cz/extranet/vav/geochemie-zp/radon/symposia/2006/radon-2006-258-265.pdf>) or Indoor Radon in Hungary (Lognormal Mysticism) (<http://www.geology.cz/extranet/vav/geochemie-zp/radon/symposia/2006/radon-2006-252-257.pdf>) for a discussion.

Pershagen G, Zhong-Hua L, Hrubec Z, Svensson C, and Boice JD. (1992). Residential radon exposure and lung cancer in Swedish women. *Health Physics* 63(2):179-186.

Pritchard HM and Gesell TF. (1981). An estimate of population exposure due to radon in public water supplies in the area of Houston, Texas. *Health Physics* 41:599-606.

Proctor, Robert N. *The Nazi War on Cancer*. Princeton University Press, 2000 p. 99 ISBN 0691070512.

Protecting dwellings with suspended timber floors: a BRE guide to radon remedial measures in existing dwellings. Building Research Establishment Report Ref BR239, 1993.

Radon (<http://www.epa.gov/radon/>) and radon publications (<http://www.epa.gov/radon/pubs/index.html>) at the United States Environmental Protection Agency

Radon (<http://www.periodicvideos.com/videos/086.htm>) at The Periodic Table of Videos (University of Nottingham)

Radon (Rn) (<http://web.archive.org/web/20071222042407/http://www-carmin.cea.fr/espace-pedagogique/rayonnements-ionisants-et-sante/les-radionucleides/radon-rn>). CEA. 12 April 2005. (in French)

Radon and Lung Health from the American Lung Association ([http:// web. archive. org/ web/ 20090713013203/ http:// www. lungne. org/ site/ c. ieJPISOvErH/ b. 4135285/ k. B764/ Radon. htm](http://web.archive.org/web/20090713013203/http://www.lungne.org/site/c.ieJPISOvErH/b.4135285/k.B764/Radon.htm))

Radon Information from the UK Health Protection Agency ([http:// www. ukradon. org/](http://www.ukradon.org/))

Radon sumps: a BRE guide to radon remedial measures in existing dwellings. Building Research Establishment Report Ref BR227, 1992.

Radon Toxicity: Who is at Risk? ([http:// web. archive. org/ web/ 20090116120009/ http:// www. atsd. r. cdc. gov/ csem/ radon/ whosat_ risk.](http://web.archive.org/web/20090116120009/http://www.atsdr.cdc.gov/csem/radon/whosat_risk)

Radon's impact on your health– Lung Association ([http:// www. pq. lung. ca/ environment-environnement/ radon/](http://www.pq.lung.ca/environment-environnement/radon/))

Radonutredningen (The Swedish Radon Commission), 1983: Radon in dwellings. Report from the Radon Commission, Ministry of Agriculture.SOU 1983:6. Stockholm (in Swedish), 145 pp. ISBN 91-38-07433-8.

Reagan R. (1988). Title III--Indoor Radon Abatement. Amendment to the Toxic Substances Control Act. Signed into law by R. Reagan in Oct. 1988.

Reducing Environmental Cancer Risk – What We Can Do Now ([http:// web. archive. org/ web/ 20100528010149/ http:// deainfo. nci. nih.gov/ / advisory/ pcp/ pcp08-09rpt/ PCP_Report_08-09_508. pdf](http://web.archive.org/web/20100528010149/http://deainfo.nci.nih.gov/advisory/pcp/pcp08-09rpt/PCP_Report_08-09_508.pdf)). US Department of Health and Human Services. 2008–2009 Annual Report

Replies to Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies ([http:// www. bmj. com/ content/ 330/ 7485/ 223?tab=responses](http://www.bmj.com/content/330/7485/223?tab=responses)). [www. bmj. com](http://www.bmj.com). Retrieved on 2012-04-14.

Risk Assessment of Radon in Drinking Water ([http:// www. nap. edu/ openbook. php?isbn=0309062926](http://www.nap.edu/openbook.php?isbn=0309062926)). Nap.edu (2003-06-01). Retrieved on 2011-08-20.

Samuelsson C. (1988). Retrospective determination of radon in houses. *Nature* 334:338-340.

Samuelsson C. (1992). Recoil deposited Po-210 in radon-exposed dwellings. In Cross, p. 89-100.

Schmidt A, Puskin JS, Nelson N and Nelson CB. (1992). EPA's approach to assessment of radon risk. In Cross, p. 923-933.

Sealing cracks in solid floor: a BRE guide to radon remedial measures in existing dwellings. Building Research Establishment Report Ref BR270, 1994.

Should you measure the radon concentration in your home? (<http://www.stat.columbia.edu/~gelman/research/published/sagtufinal.pdf>), Phillip N. Price, Andrew Gelman, in Statistics: A Guide to the Unknown, January 2004.

Stidley CA , and Samet JM. (1993)A review of ecologic studies of lung cancer and indoor radon. Health Physics 65 (3): 234-251, 1993

Surveying dwellings with high indoor radon levels: a BRE guide to radon remedial measures in existing dwellings. Building Research Establishment Report Ref BR250, 1993.

Swiss Public Health Department <http://www.ch-radon.ch>

Technical Guidance Document C - Site preparation and resistance to moisture (TGD-C).

Thad. Godish, (2001) . "Indoor Environment Quality". Boca Raton, FL. CRC Press LLC.

The Geology of Radon (<http://www.usinspect.com/resources-for-you/house-facts/>

Toxicological Profile for Radon (<http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp145.html>), Draft for Public Comment, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, September 2008

Toxicological profile for radon (<http://www.bvsde.paho.org/bvstox/i/fulltext/toxprofiles/radon.pdf>), Agency for Toxic Substances and Disease Registry, U.S. Public Health Service, In collaboration with U.S. Environmental Protection Agency, December 1990.

United Kingdom National Radiation protection Board <http://www.nrpb.org>

UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly (http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000_1.html), with scientific annexes: Annex B: Exposures from natural radiation sources.

US Environmental Protection Agency <http://www.epa.gov/iaq/radon/index.html>

US National Radon Safety Board <http://www.nrsb.org/>

US National Research Council, Board on Effects of Ionising Radiation VI Report on Health Effects of Exposure to Radon (full text) <http://www.nap.edu/books/0309056454/html/index.html>

US Nuclear Regulatory Committee <http://www.nrc.gov>

Wakita, H., (1996). Earthquake chemistry II, collected papers, edn, Vol. II, Laboratory for Earthquake Chemistry, Faculty of Science, University of Tokyo, Japan

WHO Handbook on Indoor Radon (http://whqlibdoc.who.int/publications/2009/9789241547673_eng.pdf). World Health Organization Radon.

www.rpii.ie/radon Radon in Existing Buildings - Corrective Options. Department of the Environment and Local Government, 2002.

Xiang-Zhen X, Lubin JH, Jun-Yao L, Li-Fen Y, Sheng LQ, Lan Y, Jian-Zhang W, and Blot WJ (1993). A cohort study in southern China of tin miners exposed to radon and radon decay products. *Health Physics* 64(2):120-131, 1993.

ГЛОССАРИЙ

Активность (A) – мера радиоактивности какого-либо количества радионуклида, находящегося в данном энергетическом состоянии в данный момент времени: $A = \frac{dN}{dt}$, где dN – ожидаемое число спонтанных ядерных превращений из данного энергетического состояния, происходящих за промежуток времени dt . Единицей активности является беккерель (Бк).

Использовавшаяся ранее внесистемная единица активности кюри (Ки) составляет $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк.

Активность удельная (объемная) – отношение активности A радионуклида в веществе к массе m (объему V) вещества: $A_m = \frac{A}{m}$, $A_v = \frac{A}{V}$.

Единица удельной активности – беккерель на килограмм, Бк/кг. Единица объемной активности – беккерель на метр кубический, Бк/м³.

Активность эквивалентная равновесная объемная (ЭРОА) дочерних продуктов изотопов радона – ^{222}Rn и ^{220}Rn – взвешенная сумма объемных активностей короткоживущих дочерних продуктов изотопов радона – ^{218}Po (RaA); ^{214}Pb (RaB); ^{214}Bi (RaC); ^{212}Pb (ThB); ^{212}Bi (ThC) соответственно:

$$(\text{ЭРОА})_{\text{Rn}} = 0,10 A_{\text{RaA}} + 0,52 A_{\text{RaB}} + 0,38 A_{\text{RaC}}$$

$$(\text{ЭРОА})_{\text{Tn}} = 0,91 A_{\text{ThB}} + 0,09 A_{\text{ThC}}, \text{ где}$$

A_i – объемные активности дочерних продуктов изотопов радона.

Альфа-частица – два нейтрона и два протона связанные как единая частица испускаемая с ядер определенных радиоактивных изотопов в процессе их распада.

Аномалия – существенное превышение полученных значений над местным фоном. Критерием для выделения слабых аномалий служит местный фон. Контрастность аномалий – превышение ее над уровнем фона. Показатель контрастности γ – отношение между амплитудой превышения аномалии над фоном и показателем степени его устойчивости: $\gamma = \frac{I_{\text{макс}} - I_{\text{фон}}}{S}$ (в случае

нормального распределения $I_{фон} = \bar{I}$); $\gamma = \frac{1}{\lg \varepsilon} \lg \frac{I_{макс}}{I_{фон}}$ (в случае нормального распределения $I_{фон} = \tilde{I}$).

Взвешивающие коэффициенты для отдельных видов излучения при расчете эквивалентной дозы (W_R) - используемые в радиационной защите множители поглощенной дозы, учитывающие относительную эффективность различных видов излучения в индуцировании биологических эффектов

| | |
|---|----|
| Фотоны любых энергий | 1 |
| Электроны и мюоны любых энергий | 1 |
| Нейтроны с энергией менее 10 кэВ | 5 |
| от 10 кэВ до 100 кэВ | 10 |
| от 100 кэВ до 2 МэВ | 20 |
| от 2 МэВ до 20 МэВ | 10 |
| более 20 МэВ | 5 |
| Протоны с энергией более 2 МэВ, кроме протонов отдачи | 5 |
| Альфа-частицы, осколки деления, тяжелые ядра | 20 |

Взвешивающие коэффициенты для тканей и органов при расчете эффективной дозы (W_T) - множители эквивалентной дозы в органах и тканях, используемые в радиационной защите для учета различной чувствительности разных органов и тканей в возникновении стохастических эффектов радиации:

| | |
|-----------------------------|------|
| Гонады | 0,20 |
| Костный мозг (красный) | 0,12 |
| Толстый кишечник | 0,12 |
| Легкие | 0,12 |
| Желудок | 0,12 |
| Мочевой пузырь | 0,05 |
| Грудная железа | 0,05 |
| Печень | 0,05 |
| Пищевод | 0,05 |
| Щитовидная железа | 0,05 |
| Кожа | 0,01 |
| Клетки костных поверхностей | 0,01 |
| Остальное | 0,05 |

Вытяжка – удаление воздуха из помещения. Когда внутренний воздух вытягивается из здания, внешний воздух

(включая почвенный газ) инфильтруется внутрь помещения для замещения вытяжного воздуха.

Гормезис радиационный – эффекты, связанные с проявлением стимулирующего действия малых доз облучения. Проявления стимулирующих эффектов малых доз свидетельствуют о повышении при их воздействии надежности механизмов гомеостаза, в частности, за счет адаптивной (в ответ на повреждение клеток) активации восстановительных процессов в разных системах.

Доза поглощенная (D) – величина энергии ионизирующего излучения, переданная веществу: $D = \frac{d\bar{e}}{dm}$, где $d\bar{e}$ – средняя энергия, переданная ионизирующим излучением веществу, находящемуся в элементарном объеме, dm – масса вещества в этом объеме.

Энергия может быть усреднена по любому определенному объему, и в этом случае средняя доза будет равна полной энергии, переданной объему, деленной на массу этого объема. В единицах СИ поглощенная доза измеряется в джоулях, деленных на килограмм ($\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$), и имеет специальное название - грей (Гр). Используемая ранее внесистемная единица рад равна 0,01 Гр.

Диагностика (радоновая) – процедуры, используемые для установления условий или характеристик строений с точки зрения поступления в них радона, увеличения уровня радона или обеспечивать информацией об осуществлении системы коррекции от облучения радоном.

Доверительный матричный индекс (Confidence Index Matrix) показывает количество и качество данных, избранных для оценки потенциальной радоновой опасности. Используется в вычислительных системах классификация радоновых рисков.

Доза эквивалентная ($H_{T,R}$) – поглощенная доза в органе или ткани, умноженная на соответствующий взвешивающий коэффициент для данного вида излучения, W_R :

$$H_{T,R} = W_R \cdot D_{T,R}, \text{ где}$$

$D_{T,R}$ – средняя поглощенная доза в органе или ткани T,

W_R – взвешивающий коэффициент для излучения R.

При воздействии различных видов излучения с различными взвешивающими коэффициентами эквивалентная доза

определяется как сумма эквивалентных доз для этих видов излучения:

$$H_T = \sum_R H_{T,R}$$

Единицей эквивалентной дозы является зиверт (Зв).

Доза эффективная (E) – величина, используемая как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их радиочувствительности. Она представляет сумму произведений эквивалентной дозы в органах и тканях на соответствующие

$$E = \sum_T W_T H_T$$

взвешивающие коэффициенты: , где

H_T – эквивалентная доза в органе или ткани T,

W_T – взвешивающий коэффициент для органа или ткани T.

Единица эффективной дозы – зиверт (Зв).

Доза эффективная коллективная – мера коллективного риска возникновения стохастических эффектов облучения; она равна сумме индивидуальных эффективных доз. Единица эффективной коллективной дозы – человек-зиверт (чел. - Зв).

Долговременные (радоновые) испытания (long-term (radon) testing) – испытания более чем 90 дней.

Интенсивность (мощность) источника (source strength) – концентрация радона в почве или коренных породах.

Инфильтрация – движение воздуха внутрь закрытого пространства через трещины и отверстия.

Калибровка – определение аппаратного отклика прибора и сравнение его с серией известных величин для всего измерительного диапазона; результаты калибровки используют для введения коррекции или калибровочного фактора.

Карта радоновых зон (Map of Radon Zones) – карта пространственного распределения областей с одинаковым радоновым потенциалом.

Категория населения. Категория А (персонал) – люди, которые постоянно или временно работают непосредственно с источниками ионизирующих излучений. Допустимая доза 50 мЗв/год. При этом суммарная лучевая нагрузка до N лет не должно превышать дозу: $D = 50 \text{ мЗв/год} \cdot (N \text{ лет} - 18 \text{ років})$, в мЗв.

Категория Б (персонал) – люди, которые непосредственно не занятые работой с источниками ионизирующего излучения, но в

связи с размещением рабочих мест в помещениях и на промышленных объектах с радиационно-ядерными технологиями могут получать дополнительное излучение. Допустимая доза 5 мЗв/лет.

Категория В – все население. Допустимая доза до 5 мЗв за 30 лет.

Контроль качества – система действий для поддержания качества, включающая надежные измерения и их мониторинг; а также калибровки, дублирование, междулабораторные проверки и аудит.

Контрольный источник – радиоактивный источник (не обязательно калиброванный), который используется для подтверждения непрерывных измерений.

Концентрация потенциальной альфа-энергии (РАЕС) – концентрация потенциальной альфа-энергии в воздухе с любой смесью материнских и дочерних продуктов радон-222 и радона 220 на единицу объема воздуха. Выражается Дж/м³.

Короткопериодные испытания – измерения радона длительностью от 2 до 90 дней.

Мембрана – гибкий материал (пластиковая пленка), защищающий от прохода воздуха. Покрывается на земляной или гравийный пол (подпол).

Место рабочее – место постоянного или временного пребывания персонала для выполнения производственных функций в условиях воздействия ионизирующего излучения в течение более половины рабочего времени или двух часов непрерывно.

Месячный рабочий уровень (WLM) – WLM отвечает экспозиции 1 WL ($2,08 \cdot 10^{-5}$ Дж/м³) на протяжении рабочего периода в один месяц (170 часов).

Метод высокого давления (plenum method) – давление выше атмосферного, создаваемое кондиционерами или вентиляторами для перераспределения воздуха в здании.

Неопределенность – оценочные границы отклонения от среднего значения, выраженное обычно в процентах среднего значения.

Несвязанная часть потенциальной альфа энергии f_p (*unattached fraction of potential alpha energy f_p*) – часть газовых продуктов распада радона, не связанных с аэрозольными частицами.

Оценка потенциальной радоновой опасности (*assess radon potential*) базируется на выделении ряда поисковых признаков, ранжированных по своей значимости. Геологические комплексы, как наиболее важные факторы, влияющие на распределение радонового потенциала, адаптируются под административные границы при получении карт радоновых зон.

Пассивное радон-измерительное устройство – радон измерительная система, в которой пробоотборное устройство, детектор и измерительная система не интегрированы.

Персонал - лица, работающие с техногенными источниками излучения (группа А) или находящиеся по условиям работы в сфере их воздействия (группа Б).

Потенциальная альфа-энергия – общая альфа-энергия испускаемая в цепи распад атомов радона и торона до свинца-210 и свинца-208 соответственно. Выражается в Дж или МэВ.

Почвенный газ – смесь воздуха, влаги, природных и синтетических загрязнителей в пространстве между частицами грунта и трещинами породы.

Предел дозы (ПД) – величина годовой эффективной или эквивалентной дозы техногенного облучения, которая не должна превышать в условиях нормальной работы. Соблюдение предела годовой дозы предотвращает возникновение детерминированных эффектов, а вероятность стохастических эффектов сохраняется при этом на приемлемом уровне.

Предел годового поступления (ПГП) – допустимый уровень поступления данного радионуклида в организм в течение года, который при монофакторном воздействии приводит к облучению условного человека ожидаемой дозой, равной соответствующему пределу годовой дозы.

Проницаемость - способность почвенного газа двигаться через поры и трещины в заполнителе, грунте и горной породы.

Рабочий уровень (WL) – 1 WL радона отвечает концентрации потенциальной альфа-энергии короткоживущих продуктов распада в равновесии с радоном в 3700 Бк/м³ (100 пКи/л). Это

отвечает концентрации продуктов распада радона испускающего $2,08 \cdot 10^{-5}$ Дж/м³ (или $1,3 \cdot 10^5$ МэВ) в воздухе. 1 WL торона отвечает концентрации потенциальной альфа-энергии короткоживущих продуктов распада в равновесии с тороном в 275 Бк/м³ (7,43 пКи/л). Это отвечает концентрации продуктов распада торона (ThВ (Po-222) и ThС (Pb-208)) испускающего $1,3 \cdot 10^5$ МэВ) в воздухе.

Равновесный фактор F – связан с потенциальной альфа-энергией и определяется как отношение эквивалентной равновесной концентрацией радона к измеренной концентрации радона в воздухе. Общепринятой значение F 0,5 (т.е. продукты распада на полпути к достижению равновесия). Равновесный фактор изменяется во времени и пространстве, колеблясь от 0,3 до 0,7.

Радоновый матричный индекс (Radon Index Matrix) – количественная оценка потенциальной радоновой опасности. Используется в вычислительных системах классификации радоновых рисков.

Распад – превращение одного радиоактивного элемента в другой, что сопровождается испусканием радиоактивности.

Радиационная безопасность населения – состояние защищенности настоящего и будущего поколений людей от вредного для их здоровья воздействия ионизирующего излучения.

Самотяга (stack effect) – общее восходящее движение воздуха внутри помещений как результат подъема нагретого воздуха и вытекание его через отверстия в конструкции здания. Таким образом давление наружного воздуха в самых низких частях здания оказывается ниже давления в грунте окружающих фундамент здания.

Снижение (dilution) – часть стратегии радоновой коррекции призвания снижать концентрацию аэрозольных загрязнителей (в том числе радона) путем увеличения количества внешнего воздуха в вентилируемом пространстве.

Степень воздухообмена – оценивается 2-мя путями: 1) кратность замещения внешним воздухом объема воздуха в здании за единицу времени (количество замещений за час); 2)

количество раз замещений вентиляционной системой в пределах комнаты или здания.

Точки входа (*entry routes of soil gas*) – отверстия между внутренней частью здания и грунтом.

Точность - степень согласия между измеренной x и принятой относительной или истинной величины T . Обычно выражается как разница между двумя величинами ($x - T$) или в процентах относительно истинной величины ($100 \times (x - T) / T$) или (x / T).

Чувствительность – способность радон-измерительного устройства воспроизводить надежные измерения при низких концентрациях. Эта способность зависит от изменчивости фонового сигнала, а также эффективности детектора.

Фоновая радиация – радиация, происходящая от радиоактивных материалов, Солнца, Космоса.

Эксфильтрация – вытягивание воздуха из закрытого пространства здания через трещины и отверстия.

Эффективность детектора – связь между количеством зарегистрированных событий (скорости счета, снижения напряжения, треков) и количеством радиоактивных частиц попадающих на чувствительный элемент детектора на единицу времени.

Эффекты излучения детерминированные – клинически выявляемые вредные биологические эффекты, вызванные ионизирующим излучением, в отношении которых предполагается существование порога, ниже которого эффект отсутствует, а выше – тяжесть эффекта зависит от дозы.

Эффекты излучения стохастические – вредные биологические эффекты, вызванные ионизирующим излучением, не имеющие дозового порога возникновения, вероятность возникновения которых пропорциональна дозе и для которых тяжесть проявления не зависит от дозы.

Единицы измерений концентраций радона

Концентрация радона в атмосфере, в системе СИ, обычно измеряют в беккерелях на кубический метр; мощность

экспозиции выражается в джоуль-часах на метр кубический воздуха.

В США для таких целей принята единица пикокюри на литр (пкКи/л). $1 \text{ пкКи/л} = 37 \text{ Бк/м}^3$. Типичный уровень концентрации радона в внешнем воздухе, принятый в США, составляет $0,2 \text{ пкКи/л}$; в воздухе жилых домов среднее значение активности составляет 48 Бк/м^3 ; в наружном воздухе – 15 Бк/м^3 . Приведены средние значения, тогда как рядовые могут очень широко варьироваться.

В горной промышленности и измерения уровней радона в жилищах традиционно измеряют в рабочих уровнях (WL), а мощность экспозиции в месячном рабочем уровне (WLM). Единица WL введена для оценки экспозиции от облучения радоном на рабочем месте там, где нет полной информации о степени равновесия радона с дочерними продуктами. 1 WL равняется концентрации короткоживущих продуктов распада радона-222 в любой комбинации в 1 литре воздуха, которые испускают $1,3 \cdot 10^5 \text{ МэВ}$ потенциальной альфа-энергии.

В системе СИ один WL равен $2,08 \cdot 10^{-5} \text{ Дж/м}^3$ воздуха. Месячный рабочий уровень WLM определяется как облучение на протяжении 170 часов ($21,25 \text{ рабочих дня/месяц} \times 8 \text{ часов/день}$) на рабочем месте. Таким образом, дневная 12 часовая экспозиция в доме на один WL отвечает приблизительно 26 WLM/год или $1 \text{ WLM} = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} \cdot \text{час/м}^3$ или $22,1 \cdot 10^{-6} \text{ МэВ} \cdot \text{час} \cdot \text{л}^{-1}$. Мощность экспозиции в 1 WLM (грубо) отвечает проживанию на протяжении года в атмосфере с концентрацией радона 230 Бк/м^3 .

Количество времени, связанного с уровнем облучения определяется числом WLM, но поскольку большинство людей проводят больше времени дома, чем на работе, WLM может быть выше, чем WLM, полученное от облучения на рабочем месте (например, в шахте).

Соответствие между WL и концентрациями радона в воздухе зависит от степени равновесия ДПР (которые формируют основную дозовую нагрузку на трахеобронхиальный эпителий ТВЕ) с материнским радоном. При полном равновесии, 1 пкКи/л отвечает за дозу равную $0,01$ рабочего уровня. Допущение, сделанное для равновесия в воздухе внутри помещений,

приблизительно 50%. Таким образом, $1 \text{ пкКи/л} = 0,005 \text{ WL}$ или $1 \text{ WL} = 200 \text{ пкКи/л}$.

Экспозиционная доза является количественной характеристикой только гамма- и рентгеновского облучения и характеризует ионизирующее действие заряженных частиц, возникающих при взаимодействии гамма- и рентгеновского излучения с атомами воздуха. В практике дозиметрических исследований чаще всего используется единица экспозиционной дозы рентгеновского и гамма-излучения – кулон на килограмм (система СИ) или рентген (внесистемная единица).

Кулон на килограмм (Кл/кг) – доза рентгеновского или гамма-излучения, при котором вызванное им вторичное корпускулярное излучение в 1 кг воздуха образуются ионы несущими заряд в 1 кулон.

Рентген (Р) – доза рентгеновского или гамма-излучения, при котором вызванное ими вторичное корпускулярное излучение в 0,001293 г воздуха образуются ионы несущими заряд в одну электростатическую единицу электрики каждого знака. Следует отметить, что 0,001293 г воздуха в нормальных условиях занимает объем в 1 см^3 . 1 рентгену отвечает образование в 1 см^3 воздуха $2,083 \cdot 10^9$ пар ионов. Так как на образование одной пары ионов тратится энергия в 34 эВ, следовательно 1Р отвечает поглощению 0,11 эрг энергии в 1 см^3 воздуха и 88 эрг в 1 г воздуха. $1 \text{ микрорентген} = 2,58 \cdot 10^{-16} \text{ Кл/кг}$.

Поглощенная доза D ионизирующего излучения – количество энергии, которое передается веществу (или биологической ткани) отнесенная на единицу веса облучаемого вещества. Поглощенная доза выражает энергию любого вида излучения, поглощенного в единице веса любого вещества. Эта доза измеряется в единицах грей (в системе СИ) или рад (внесистемная единица). 1 рад отвечает поглощению энергии в 100 эрг любого вида излучения на 1 г любого вещества. Следовательно, при экспозиционной дозе гамма-излучения равной 1 Р; ей отвечает поглощенная доза в 0,88 рад. То есть численные значения дозы гамма-излучения в единицах рентген и рад почти одинаковы.

Для оценки радиационной опасности хронического облучения биологической ткани излучением произвольного

состава введено понятие эквивалента дозы смешанного ионизирующего излучения (эквивалентная доза) $D_{\text{экв}}$.

С метой сравнения разных видов ионизирующих излучений по ожидаемому биологическому влиянию используется понятие коэффициента качества, а при внутреннем облучении костной ткани коэффициента распределения. Коэффициент качества Q – величина, определяющая зависимость биологического эффекта хронического облучения организма определенным видом ионизирующего облучения от величины линейной передачи энергии (ЛПЭ) этого вида облучения. ЛПЭ – отношение средней энергии ΔE , локально переданной среде заряженной частицей, которая движется в веществе, при перемещении ее на определенное расстояние Δl , к этому расстоянию $L = \Delta E / \Delta l$.

Коэффициент качества Q показывает во сколько раз биологический эффект радиоактивного облучения больше, чем гамма- и бета-излучения.

Эквивалентная доза смешанного ионизирующего излучения – величина, которая определяется суммой произведений поглощенных доз D_i отдельных видов излучения на соответствующее значение коэффициентов качества Q_i этих видов излучения и коэффициентов распределения KP_i :

$$D_{\text{экв}} = \sum_1^n D_i \cdot Q_i \cdot KP_i,$$

где $D_{\text{экв}}$ – выражается в единицах зиверт (система СИ) или бэр (внесистемная единица).

Единица поглощенной дозы ионизирующего излучения (система СИ) грей ($Гр$) – $1 Гр = 1 Дж/кг$.

Внесистемная единица – $1 рад = 1 эрг/г$; $1 Гр = 100 рад = 1 Дж/кг$.

Зиверт – единица эквивалентной и эффективной дозы в системе СИ. Внесистемная единица – бэр – $1 Зв = 1 Дж/кг = 100 бэр$.

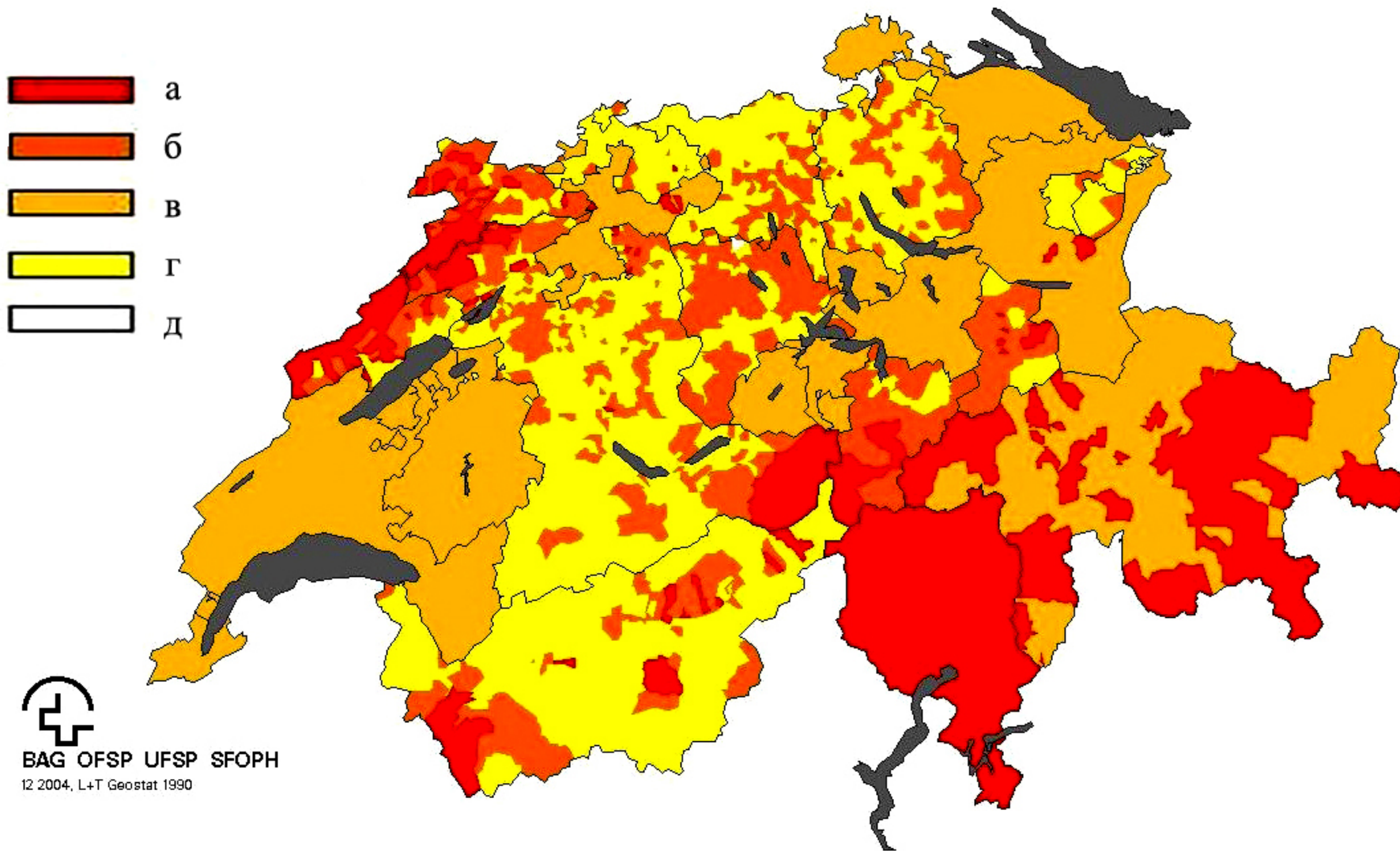
Электрон-вольт (eV) – внесистемная единица энергии излучения: $1 eV = 1,6 \cdot 10^{-19} Дж$.

| Переводные коэффициенты | | | |
|--|----------------------------|--------------------------|---|
| Единицы СИ | | | Традиционные (внесистемные) |
| Активность | Бк | Вq | 1 Ки=3,7·10 ¹⁰ Бк (1 пкКи=0,037 Бк) |
| Концентрация | Бк/м ³ | Вq/м ³ | 1 пкКи/л=37 Бк/м ³ |
| Потенциальная альфа-энергия | конц. | conc | 1 WL*=1,3·10 ⁵ МэВ/л=2,08·10 ⁻⁵ Дж/м ³ |
| Экспозиция | Дж/м ³ ·с | J/м ³ s | 1 WLM = 12,97 Дж/м ³ с |
| Экспозиция | Бк/м ³ ·го д | Вq/м ³ · у | 1 WLM = 74,0 Бк/м ³ год (для ²²² Rn серии) |
| Мощность дозы | | | 1 WLM/год = 4,11·10 ⁻⁷ Дж/м ³ |
| Мощность дозы | | | 1 WLM/год=74,0 Бк/м ³ (для ²²² Rn серии) |
| 1 WL = 200 пкКи/л (50% эквивалентного равновесия) | | | |
| 1 WL (на рабочем месте)×12 месяц/год (т.е. 8 часов/день, 5 дней/неделя)=12 WLM/год | | | |
| 1 WL (дома) ×51,6/2 месяц/год (т.е. 12 часов/день, 7 дней/неделя)=25,8 WLM/год, (0,2 пкКи/л= типичный уровень вне дома =120 млрд/год (ТВЕ) | | | |
| 1 кюри/л | Активная концентрация | | 2,2·10 ¹² расп/(мин·л). |
| 1 эман | | | 1·10 ⁻¹⁰ кюри/л воздуха или воды |
| 1 эман | | | 220 расп/(мин·л) |
| 1 эман | | | 0,275 махе. |
| 1 махе | | | 3,64 эман |
| 1 махе | | | 3,64·10 ⁻¹⁰ кюри/л |
| 1 махе | | | 780 расп/(мин·л); |
| 1 ppm U = 12,35 Бк/кг Ra-226=0,653 мкР/час (μR/h) | | | |
| 1 ppm Th = 4,06 Бк/кг Th-232 = 0.287 мкР/час | | | |
| 1% K = 313,0 Бк/кг K-40 = 1.505 мкР/час | | | |
| Индекс активности = C _K /3000+C _{Ra} /300+C _{Th} /200 (в Бк/кг) | | | |
| Индекс активности=1 ~ 0,5 мкЗв/час | | | |
| Индекс активности радия-226=200 Бк/кг | | | |
| 1 мкР/час=0,01 мкЗв/час (μSv/h) | | | |
| 1 Гр=1Дж/кг | | | |
| 1 Р=0,258 млКи/кг=0,01 Зв | | | |

Переводные коэффициенты для перехода от одних единиц измерений активности к другим

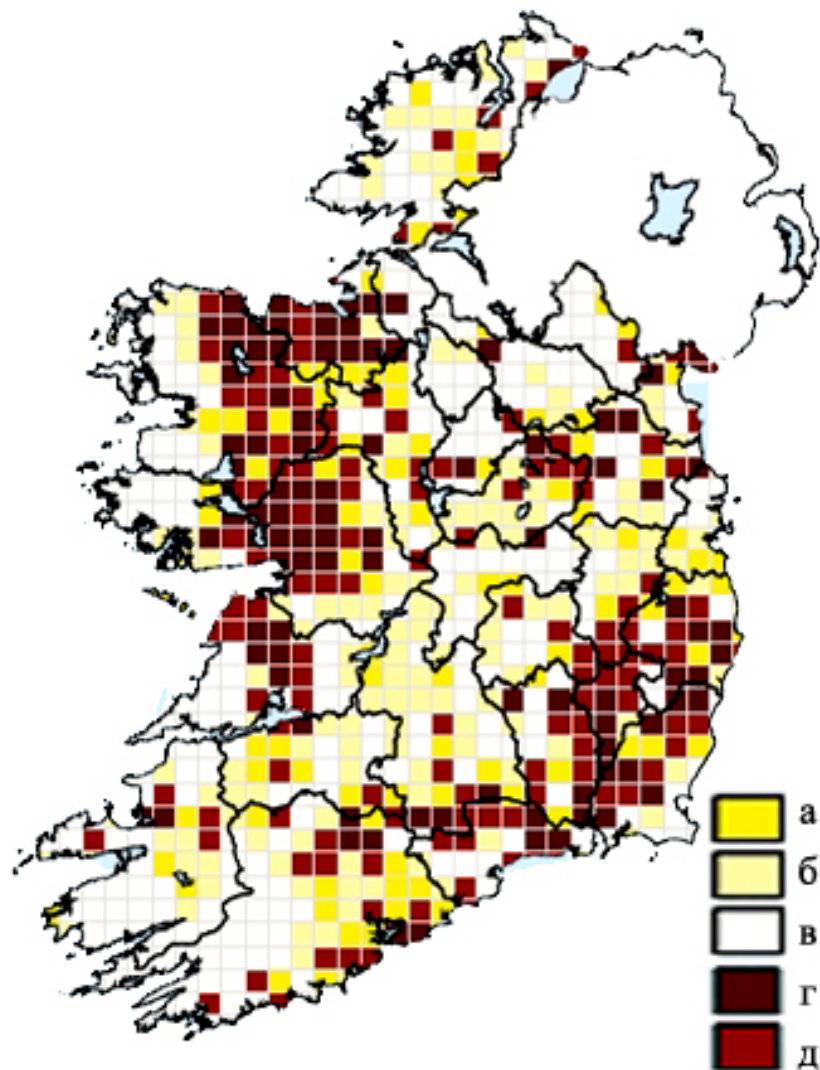
| Надо умножить | На коэффициент | Чтобы получить |
|--------------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| 1 мКи/миля ² | 0,386 | 1 мКи/км ² |
| 1 мКи/км ² | 2,59 | 1 мКи/миля ² |
| 1 мКи/м ² | 222 | 1 расп/(мин·см ²) |
| 1 расп/(мин·см ²) | $4,5 \cdot 10^{-3}$ | 1 мКи/м ² |
| 1 мКи/миля ² | 79,6 | 1 расп/(мин·фут ²) |
| 1 расп/(мин·фут ²) | 0,01256 | 1 мКи/миля ² |
| 1 мКи/см ³ | 10^{-3} | 1 Ки/л |
| 1 Ки/л | 10^3 | 1 мКи/см ³ |
| 1 расп/(мин·м ³) | $4,5 \cdot 10^{-13}$ | 1 мКи/см ³ |
| 1 мКи/см ³ | $2,22 \cdot 10^{12}$ | 1 расп/(мин·м ³) |
| 1 расп/(мин·л) | $0,45 \cdot 10^{-9}$ | 1 мКи/см ³ |
| 1 мКи/см ³ | $2,22 \cdot 10^9$ | 1 расп/(мин·л) |

РАДОНОВЫЕ КАРТЫ И КАРТЫ РАДОНОВЫХ РИСКОВ РЯДА СТРАН ЕВРОПЫ И США



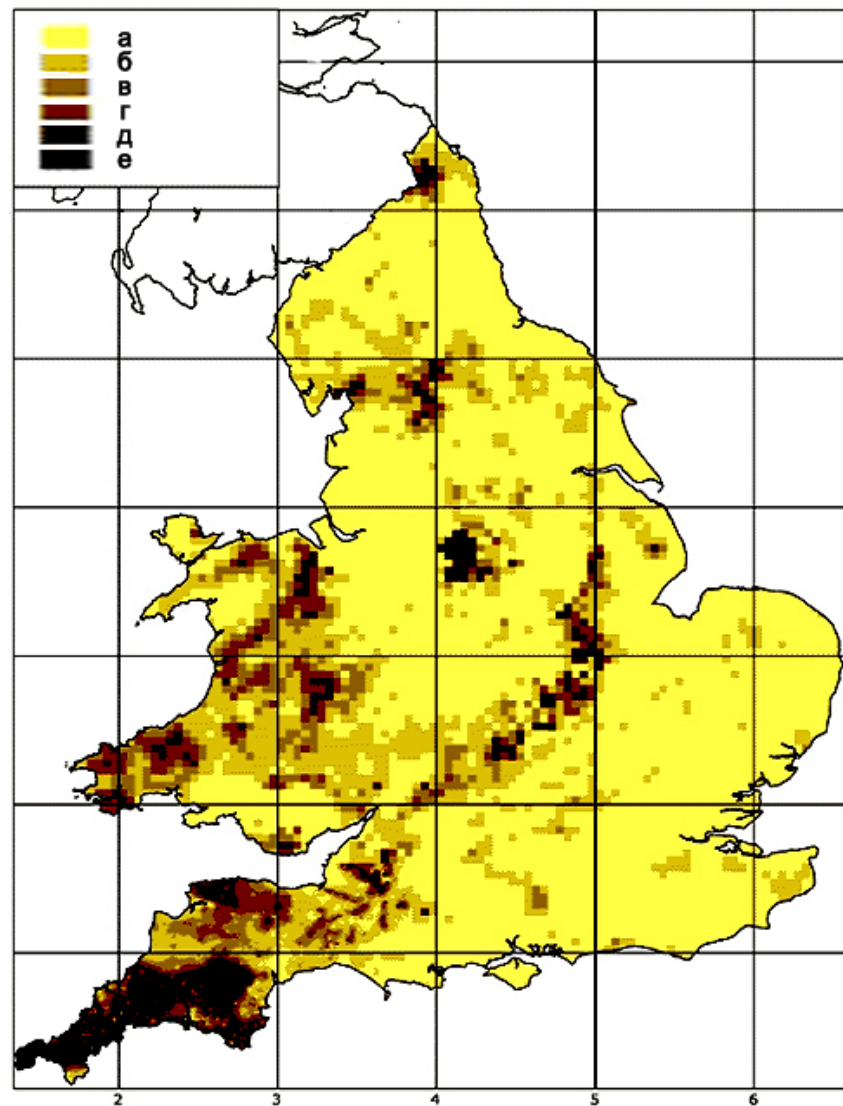
Радоновая карта Швейцарии

Радоновый риск: *а* -высокий (концентрация радона в воздухе помещений 200 Бк/м³), *б* - средний (100 – 200 Бк/м³), *в* - средненизкий (0 — 200 Бк/м³), *г* - (<100 Бк/м³), *д* - не классифицирован



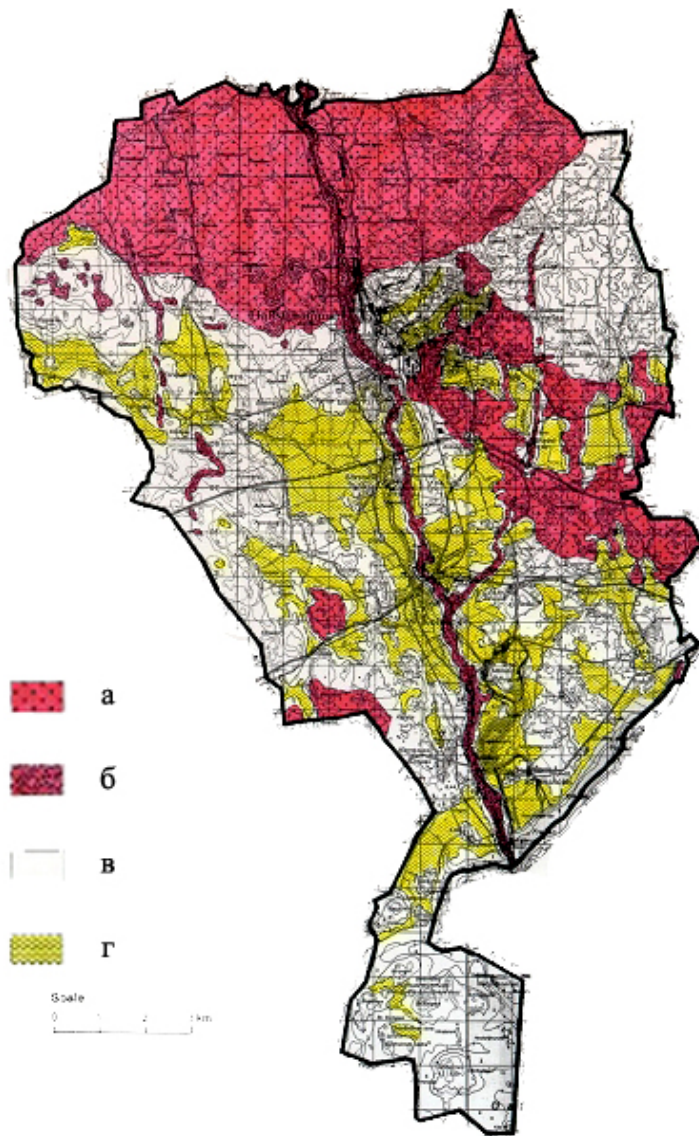
Карта радоновых рисков Республики Ирландия

Количество жилищ с концентрацией радона выше уровня действия: а) 5 – 10%, б) 1 – 5 %, в) <5 %, г) >20 %, д) 10 – 20 %.



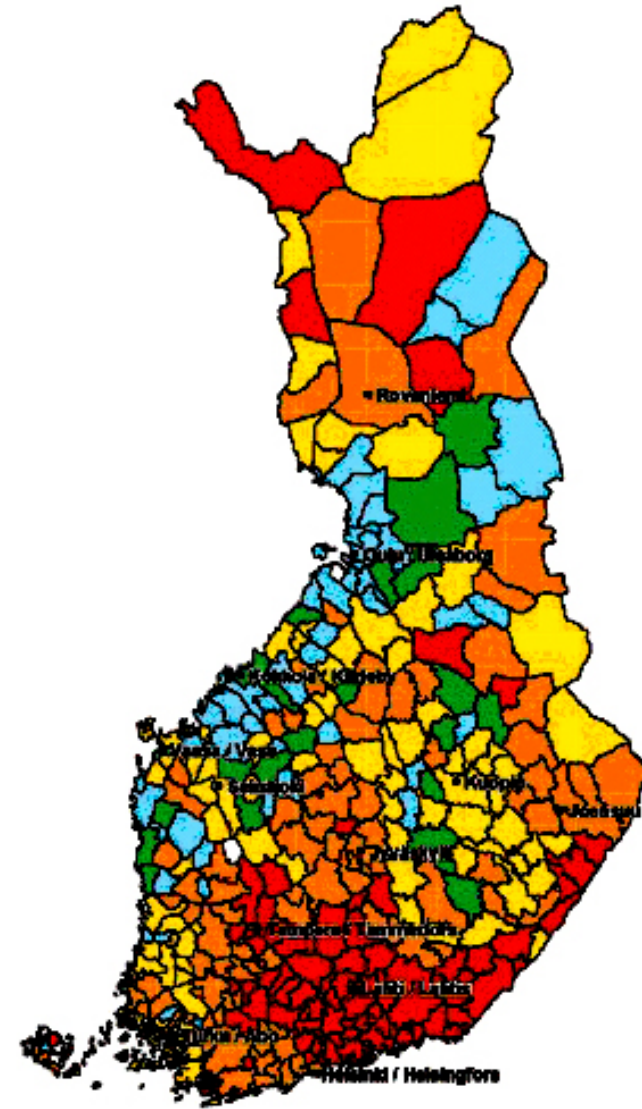
Карта радоновых рисков Великобритании

Количество жилищ с концентрацией радона выше опорного уровня: а) 0 – 1 %, б) 1 – 3 %, в) 3 – 5 %, г) 5 – 10 %, д) 10 – 30 %, е) >30 %.

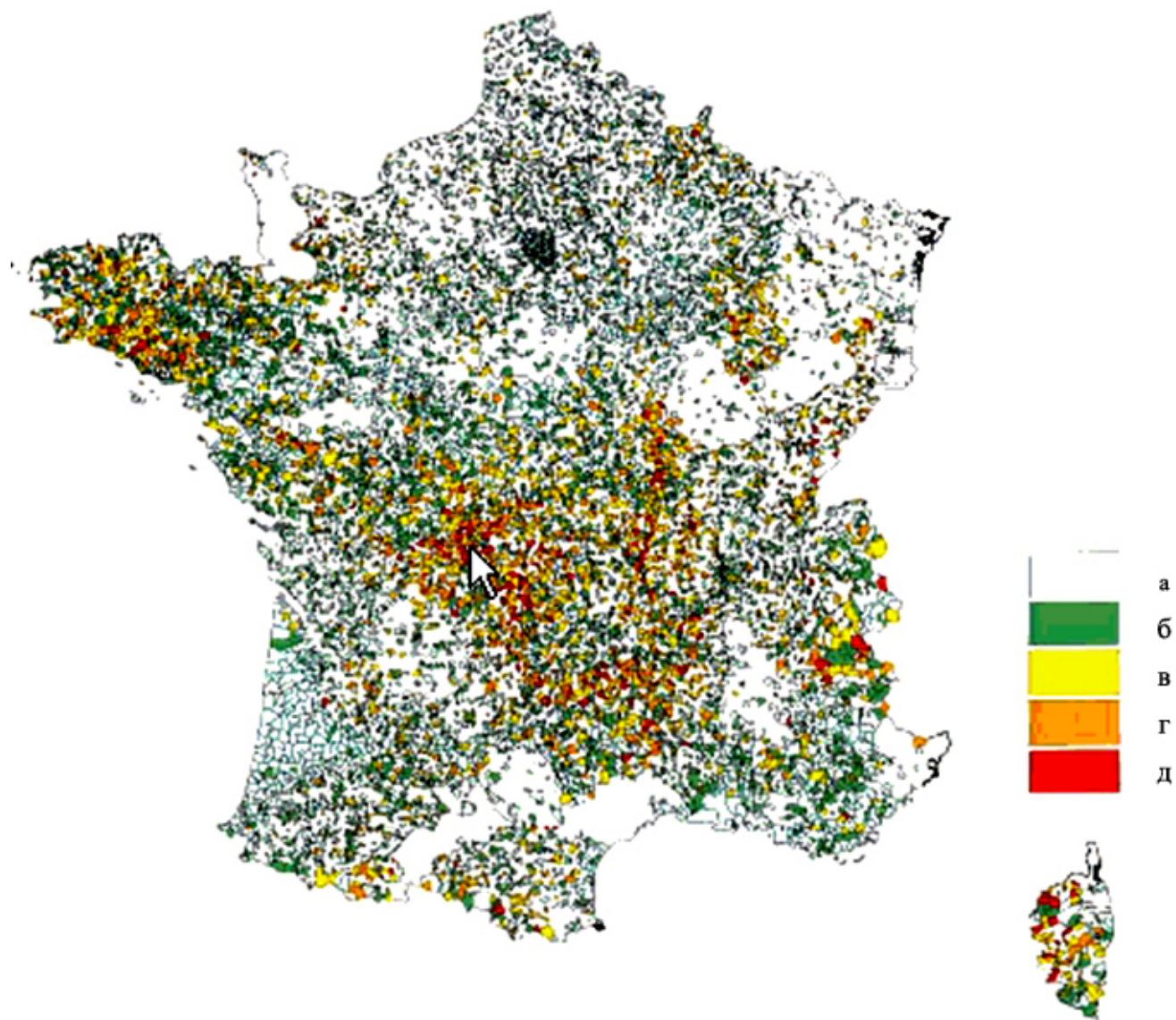


**Карта радоновых рисков муниципалитета
Хальстахаммар, Швеция**

Радоновый риск: а) высокий (коренные породы - граниты, пегматиты с повышенным содержанием урана), б) высокий (гравий и крупнозернистый песок в эскерах и осадочных отложениях), в) нормальный (коренные породы и валунная глина с нормальным содержанием урана), г) низкий (среднезернистый песок, алевролит, глины)

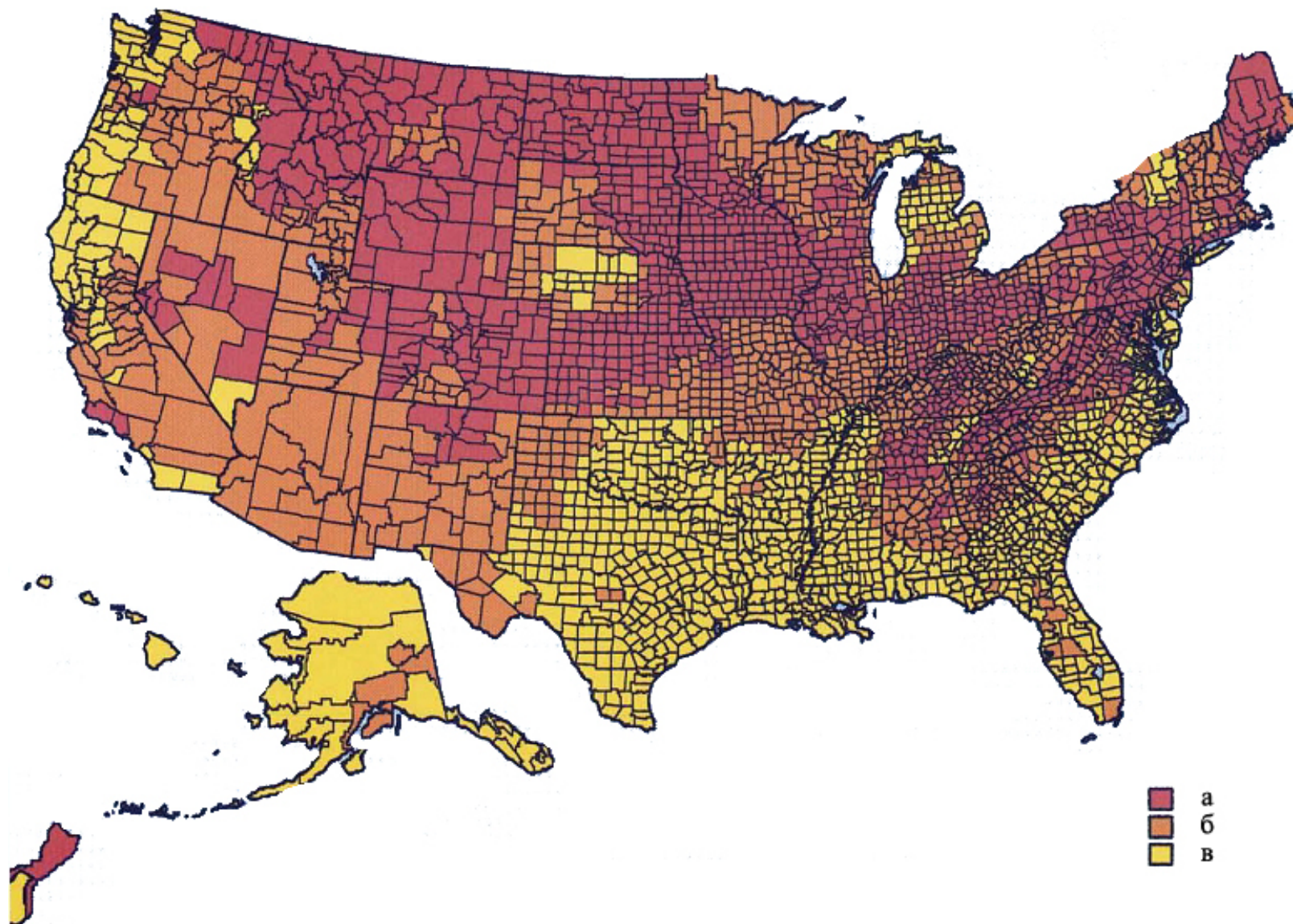


Карта радоновых рисков Финляндии



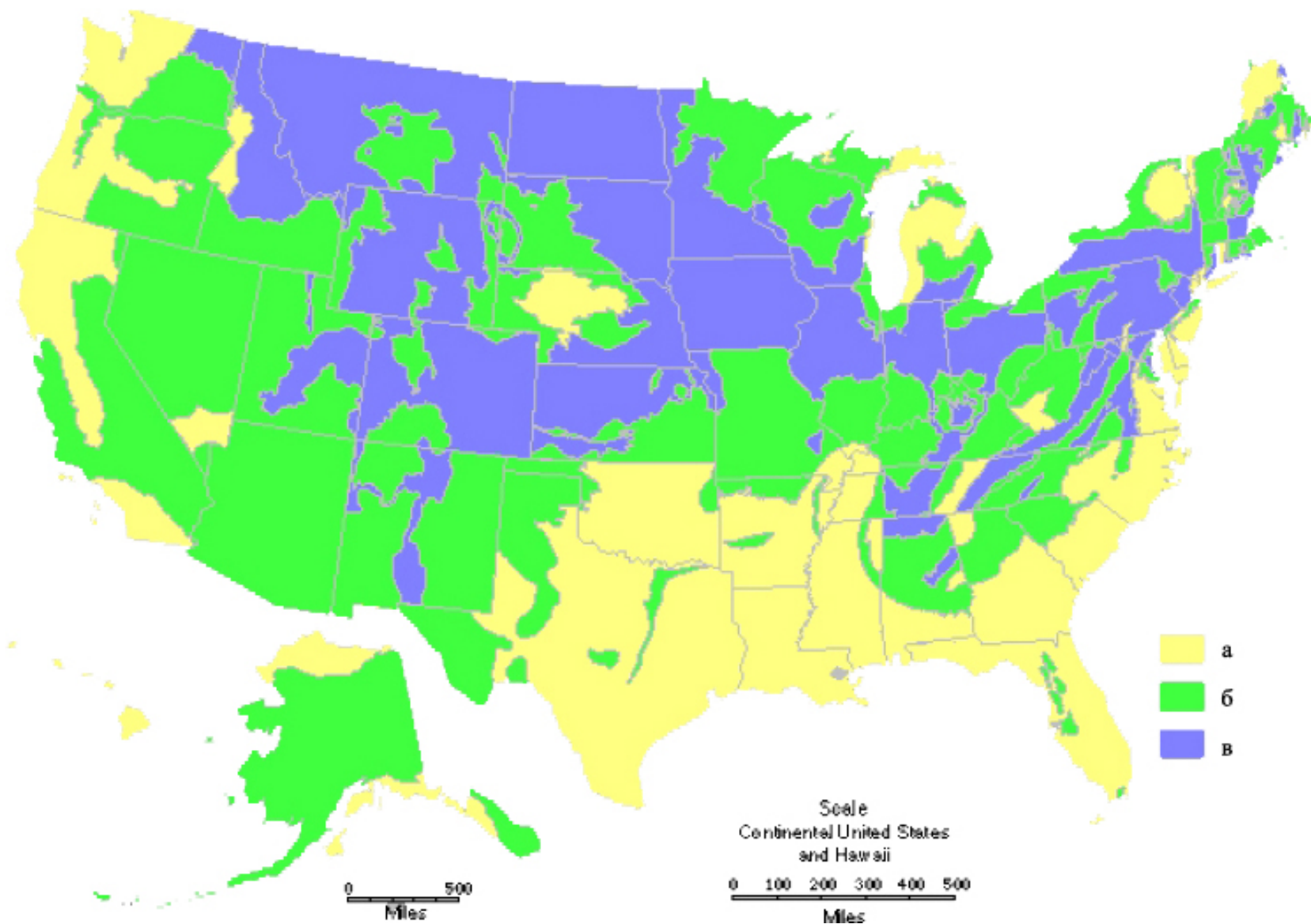
Карта радоновой съемки коммун Франции

концентрация радона в воздухе помещений 200 Бк/м^3 : а) <50 , б) $50 - 99$, в) $100 - 199$, г) $200 - 399$, д) >400 .



Карта радоновых зон сша

Зона *a*: ожидаемое среднее >150 Бк/м³; зона 2: ожидаемое среднее $\sim 75 - 150$ Бк/м³; зона 3: ожидаемое среднее <75 Бк/м³.



Генерализованная карта геогенического радонового потенциала США (данные Геологической службы США)

Ожидаемое среднее концентрации радона в Бк/м³: а) низкое (<75), б) умеренное (75 – 150), в) высокое (> 150)

**Выжва С.А., Гавриленко О.Д., Онищук, И.И.,
Шабатура А.В., Теут Е.В.**

РАДОНОВЫЙ КОНТРОЛЬ И ИЗМЕРЕНИЯ

учебник

Подписано в печать **.**.2014 г.

Формат 60x90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Таймс».

Печ.л. **. Тираж: по государственному заказу – 600 экз. Заказ №***